

STUDI SIMULASI ECOTECT SEBAGAI PENDEKATAN REDESAIN AKUSTIK AUDITORIUM

Agustinus Djoko Istiadji
Floriberta Binarti

Prodi Arsitektur Fakultas Teknik, Universitas Atmajaya Yogyakarta

ABSTRAK

Kejelasan berpidato (*speech intelligibility*) sebagai kriteria utama desain akustik auditorium merupakan fungsi dari waktu dengung (RT60). Penyediaan RT60 yang optimal (0,5-1,0 detik) yang tersebar merata (*diffuse*) di dalam ruangan ditentukan oleh faktor serap bidang dan geometri ruang. Tulisan ini memaparkan pemakaian Ecotect sebagai program untuk merancang posisi dan luas bidang serap dalam auditorium. Fasilitas kalkulasi RT60 secara statistik dan *existing acoustic particles* menjadikan Ecotect sebagai program simulasi akustik yang cukup memadai guna pendekatan desain akustik ruang. Validasi hasil simulasi terhadap hasil pengukuran lapangan dilakukan pada tahap pertama untuk menguji keandalan program. Redesain akustik auditorium dilakukan berdasarkan hasil analisis perjalanan suara (*sound path*), yakni dengan mengidentifikasi posisi dan luas bidang serap. Hasil pengujian redesain akustik auditorium dengan metode statistik maupun *existing acoustic particles* menunjukkan bahwa penerapan hasil analisis perjalanan suara cukup berhasil untuk perbaikan nilai RT60, distribusi suara, bahkan dari aspek biaya.

Kata kunci: faktor geometri, koefisien serap, simulasi komputer, waktu dengung.

ABSTRACT

Speech intelligibility, which is a function of reverberation time (RT60), is a primary criterion to design acoustic of an auditorium. Optimum RT60 (0,5-1,0 s) in a diffuse auditorium is determined by the absorption and the room geometry. This paper describes Ecotect as a computational simulation program that is supportive in deciding the position and area of absorption material in the auditorium. Calculations based on statistical reverberation and existing acoustic particles methods are sufficient for the approach of room acoustic design. Site measurement result was used to examine validity of the program. Redesign of acoustic of the auditorium, then, was done based on the result of sound path analysis by identifying the position and the area of absorption material. Final test results by statistical reverberation and existing acoustic particles methods point out that the application of sound path analysis is quite successful to improve RT60, sound distribution, and the cost.

Keywords: *absorption coefficient, computer simulation, geometry factor, reverberation time.*

PENDAHULUAN

Dewasa ini banyak auditorium dibangun sebagai tanggapan terhadap kebutuhan akan ruang multi-fungsi. Auditorium dengan kapasitas besar dengan sistem penghawaan alami adalah tipikal auditorium yang dibangun di wilayah tropis dengan dana terbatas. Sebagai ruang pidato, auditorium menuntut penyediaan waktu dengung yang cukup pendek (0,5-1,0 detik) untuk mengatasi penurunan kejelasan pengucapan (*speech intelligibility*). Di sisi lain, musik akan terasa hidup di dalam ruangan dengan waktu dengung yang cukup panjang. Kedua persyaratan ini tentunya, menciptakan kondisi yang saling berlawanan, sehingga apa yang dibutuhkan di dalam mendesain ruang akustik sebuah auditorium adalah dengan melakukan satu pilihan penekanan fungsi akustik (untuk pidato saja) sebagaimana yang dilakukan pada studi ini.

Penggunaan program komputer untuk simulasi akustik merupakan alternatif metode analisis akustik yang hemat waktu, biaya dan tenaga. Ecotect sebagai

program *computational building performance simulation* menyediakan fasilitas untuk pendekatan desain akustik, di samping juga untuk menganalisa pencahayaan, termal dan biaya. Dengan *graphic user interface* yang dilakukan di bawah platform windows, program ini menjadi *designer-friendly*. Khusus pada analisa akustik, Ecotect tidak saja dilandasi dengan perhitungan analisa waktu dengung yang berdasar pada rumus *statistical reverberation* Sabine, Eyring serta Millington, namun juga dilengkapi dengan analisa geometri akustik (*acoustic particles*) yang dapat divisualisasikan baik secara 2 dimensi maupun 3 dimensi. Kelebihan ini memberi peluang bagi perancangan ruang akustik untuk memanfaatkan kecepatan dan ketepatan di dalam memperhitungkan dan memvisualisasikan hasil analisa, yang tentu akan berguna untuk mendukung pengambilan keputusan desain akustik ruang. Proses validasi dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil pengukuran lapangan (*site measurement*) diperlukan untuk menentukan tingkat akurasi hasil simulasi yang akan menunjukkan keandalan suatu program simulasi.

KAJIAN PUSTAKA

Standard Kualitas Suara Auditorium

Karakteristik akustik ruang secara umum meliputi faktor keras suara (*loudness*), kejelasan suara (*clarity*) dan 'kehidupan suara' (*liveness*). Khusus untuk ruang auditorium yang lebih diprioritaskan untuk pidato, *speech intelligibility* yang baik untuk seluruh pendengar secara merata adalah tujuan perancangan akustiknya. Pengucapan kata atau silabi yang terdengar secara jelas dan terpisah dengan baik serta tidak terjadi pengucapan kata yang kabur, secara umum merupakan fungsi waktu dengung. Waktu dengung yang optimal untuk ruang pidato adalah 0,5-1,0 detik (*Mehta, 1999*) pada frekuensi menengah (500Hz) dan tidak akan naik banyak untuk frekuensi rendah.

Analisa Matematis Waktu Dengung

Penurunan tingkat suara biasa dikenal dengan istilah waktu dengung (*reverberation time*). Penurunan ini baik terjadi pada suara langsung yang terpengaruh oleh jarak (energi suara terserap oleh udara), maupun merupakan hasil dari multi refleksi suara yang mengandung fungsi penyerapan dan pemantulan. Di dalam ruang tertutup nilai waktu dengung proporsional dengan volume ruang dan proporsional terbalik dengan luas bidang serap (luas bidang ruang dikali koefisien serapnya).

Tiga rumus perhitungan waktu dengung yang biasa digunakan di dalam analisa akustik adalah rumus Sabine, Eyring dan Millington. Ringkasan ketiga rumus perhitungan waktu dengung:

Tabel 1: Rumus-rumus Waktu Dengung

	Sabine	Millington	Eyring
Absorption coefficients	$\bar{\alpha} < 0.2$	$\bar{\alpha} \geq 0.2$ and $\alpha_{i,f}$ do not $\rightarrow 1$	$\bar{\alpha} \geq 0.2$
Equivalent area of the boundaries $A_{f, \text{equiv}}$	$\sum_i S_i \cdot \alpha_{i,f}$	$\sum_i S_i \ln \left(\frac{1}{1 - \alpha_{i,f}} \right)$	$S \cdot \ln \left\{ 1 - \frac{\sum_i S_i \cdot \alpha_{i,f}}{S} \right\}$
where			
S_i area of surface i [m ²]			
$\alpha_{i,f}$ Sabine absorption coefficient of surface i at frequency f			

Ada dua variabel bidang penyerap suara yang mempengaruhi panjang waktu dengung, yaitu: luas dan koefisien serap. Semakin luas material penyerap suara yang digunakan maka semakin pendek waktu dengungnya. Besarnya koefisien serap material beragam menurut frekuensi suaranya. Jumlah pemakai juga termasuk sebagai faktor penyerap bunyi.

Efek Faktor Geometri Ruang pada Akustik

Faktor geometri memegang peranan yang penting di dalam mengatur waktu dengung. Perjal-

anan suara (*sound path*) di dalam ruang menghasilkan panjang pendek suara yang dipengaruhi oleh berulangnya suara terpantul dan nilai penyerapan energi yang terjadi. Energi suara merupakan energi gelombang yang merambat melalui udara dan bergerak dengan perilaku sesuai hukum-hukum gerak gelombang. Suara mengalir dengan kecepatan 343,7 m/s pada temperatur udara 20⁰ C dan pada keadaan langsung suara diterima oleh pendengar dalam waktu antara 0,01 sampai 0,2 detik. Selanjutnya, suara pantul yang terawal akan datang secara tipikal dalam jangka waktu 50 milidetik. Energi suara yang datang kemudian sudah lemah dan amplitudo mengecil, yang dikenal dengan istilah *reverberant sound* or *late reflections*.

Mengkaji mengenai ruang audio, ukuran ruang dapat dilihat dalam dua klasifikasi yaitu dimensi ruang (panjang, lebar dan tinggi) dan volume (kubik). Dimensi dari ruang lebih berpengaruh pada ukuran dan posisi bidang. Hal ini berlanjut mempengaruhi perjalanan suara, pemantulan dan penyerapan serta posisi sumber suara dan pendengar. Ruang dipertimbangkan sebagai resonator kompleks, sehingga karakteristik frekuensi suara pantul bergantung pada bentuk dan ukurannya, sedang nilai serap suara dipengaruhi oleh karakteristik bahan.

Volume ruang juga dipertimbangkan sebagai pendekatan awal perancangan waktu dengung. Volume dapat dispesifikasi dengan volume per orang untuk memperoleh pendekatan desain waktu dengung yang lebih ideal. Untuk ruang yang sangat besar dan panjang, waktu dengung akan lebih dipengaruhi oleh jarak (*distance*) daripada efek pantul (*depth*) (*Barron, 1993*). Pada umumnya ruang dengan dimensi yang besar (secara diagonal) akan mendukung penciptaan suara resonansi frekuensi rendah. Sedangkan dari segi volume, hal ini lebih berpengaruh pada pemenuhan ruang dengan energi suara yang berefek pada intensitas suara (*loudness – sound pressure*). Pada ruang dengan volume yang besar sumber suara alami manusia relatif sulit untuk memenuhi, sehingga biasanya dibantu dengan penguat suara elektrik atau *loudspeaker*.

Mengatur bidang-bidang ruang dan menentukan geometrinya merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kualitas akustik ruang. Tata letak bidang-bidang ruang harus diatur sedemikian rupa sebagai suatu fungsi pemantul suara (*reflector*) dan penyerap suara (*absorber*). Keteraturan geometri ruang, ketiadaan bentuk-bentuk bidang pemusat (*convex*), penyebaran bidang pantul dan serap serta pengatur objek pemecah suara menjadi syarat untuk menciptakan distribusi intensitas suara yang merata (*diffuse*).

TUJUAN DAN LINGKUP STUDI

Penggunaan program Simulasi Ecotect sebagai piranti pendekatan redesain waktu dengung sebuah auditorium dengan prioritas fungsi akustik sebagai tempat pidato.

METODOLOGI

Bangunan Auditorium Sebagai Obyek Studi

Obyek studi dalam kasus ini adalah sebuah ruang Auditorium Gedung Panti Paroki Gereja Kumetiran yang terletak di Jalan Kumetiran 26 Yogyakarta. Ruang ini terletak pada lantai 2 gedung tersebut dengan konstruksi permanen.

Rincian spesifikasi bangunan seperti tersebut di bawah ini:

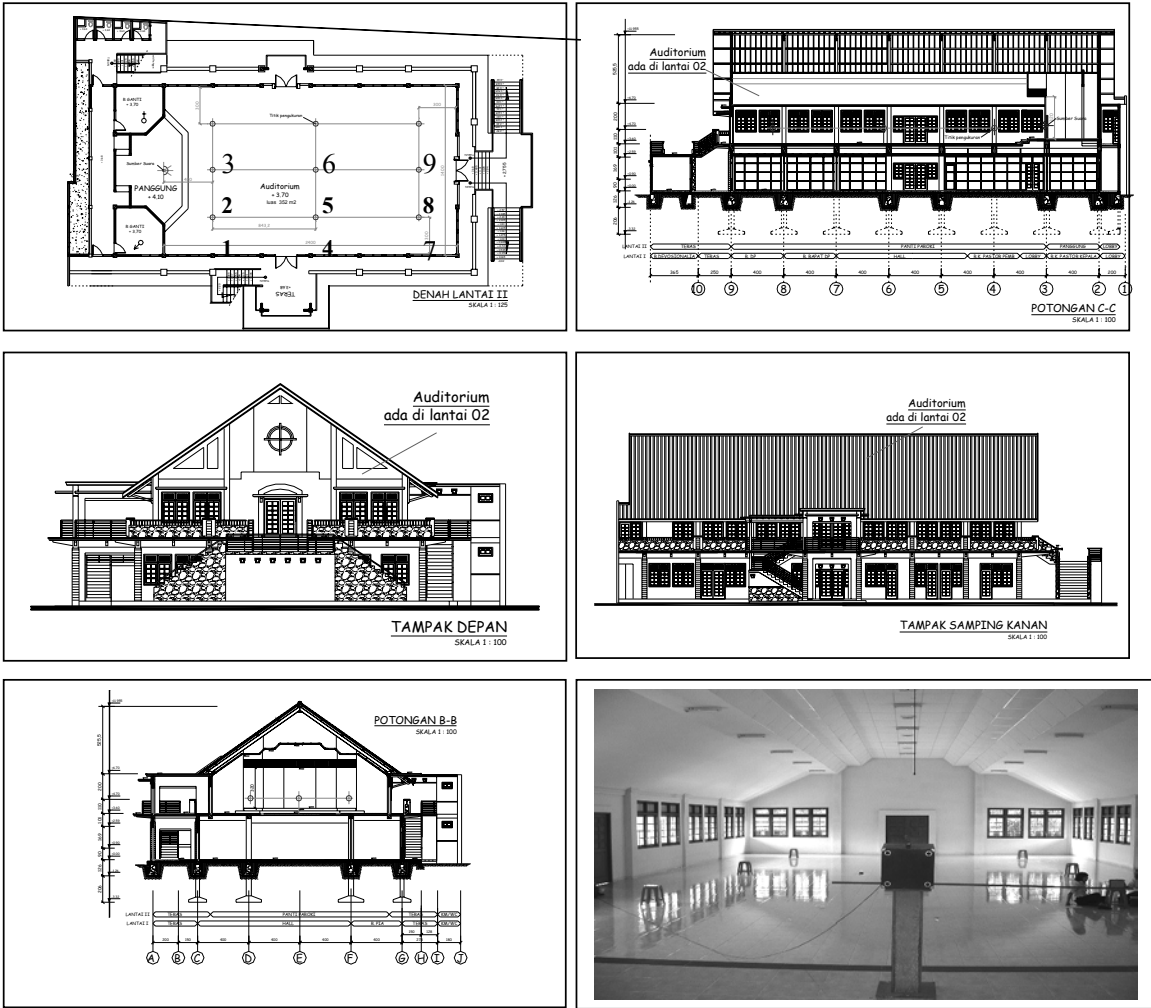
- Nama : Gedung Auditorium
- Luas/Volume ruang : 1161.5 m2/1595 m3
- Kapasistas : ± 400 tempat duduk
- Orientasi bangunan : Arah hadap muka bangunan ke arah barat

- Konstruksi bangunan :
- a. Dinding bata berplester
 - b. Lantai dak beton dilapis keramik
 - c. Plafond kombinasi gipsum and amstrong tergantung
 - d. Pintu kayu panil dengan jendela ram kaca

Studi difokuskan pada ruang auditorium dalam kondisi jendela tertutup rapat dan dalam keadaan kosong tanpa kursi. Fungsi akustik ruang lebih ditekankan untuk kegiatan suara alamiah, sehingga seluruh perangkat penguat audio secara elektrik tidak digunakan termasuk kipas dan lampu dimatikan untuk mengurangi suara gangguan.

Tahapan Penelitian:

- Tahapan pelaksanaan pengkajian masalah dilakukan melalui tiga tahap, yaitu:
- Tahap I: Pengukuran kualitas akustik (RT60) auditorium yang ada (model Eksisting) secara



Gambar 1. Denah, Potongan Membujur, Tampak Samping, Foto Interior, Potongan Melintang, Tampak Auditorium Gereja Kumetiran (Searah Jarum Jam)

statistik dan secara *acoustic particles* untuk melihat validitas hasil simulasi. Besarnya penyimpangan antara hasil simulasi secara statistik dan secara *acoustic particles* terhadap hasil pengukuran lapangan akan digunakan untuk mengkalibrasi hasil simulasi lebih lanjut.

- Tahap II: Studi simulasi dengan *acoustic particles* untuk mendukung pengambilan keputusan guna perbaikan nilai waktu dengung. Redesain akustik auditorium lebih ditekankan pada penentuan geometri dan posisi bidang-bidang serap.
- Tahap III: Pengujian nilai waktu dengung, distribusi suara, fleksibilitas desain terhadap jumlah pemakai dan aspek biaya pada model Desain dan beberapa model lain dengan variasi bidang serap pada plafond (model ‘Ceiling’) dimaksudkan sebagai pembanding hasil perancangan ulang dengan *acoustic particles* atau yang disebut sebagai model ‘Desain’. Pengujian dilakukan dengan simulasi secara statistik maupun secara *acoustic particles*.

Pengukuran Waktu Dengung Lapangan

Pengukuran di lapangan dilakukan dengan menggunakan Sound Pressure Analyzer. Peralatan ini merupakan rangkaian dari sound pressure level, pengukur sinyal yang dihasilkan oleh Sound Generator, yang dihubungkan ke Bruel & Kjaer Level Recorder tipe 2306 sebagai pencatat tekanan suara.

Langkah pertama adalah menentukan posisi sumber suara (posisi pembicara) yang dihasilkan oleh Sound Generator yang bersifat tetap. Posisi pendengar diambil dari 9 titik (lihat denah pada Gb.1) yang dianggap mewakili area pendengar. Sebuah Sound Pressure Level yang dilengkapi dengan microphone ditempatkan pada posisi tersebut dengan ketinggian sesuai dengan tinggi telinga pendengar, yakni: 1,00 m. SPL ini dihubungkan ke Level Recorder yang memiliki logarithmic potentiometer yang mampu mengubah tekanan suara ke decibel (dB). Setiap titik dilakukan pengukuran sebanyak tiga kali untuk setiap frekuensi suara yang dipilih, yaitu: 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, dan 2000 Hz yang tercakup di dalam jangkauan frekuensi suara manusia (125 Hz – 4 kHz). Suara yang dihasilkan dari sound generator adalah

interrupted pink noise dengan tingkat intensitas 80 dB pada frekuensi 500 Hz sesuai dengan intensitas suara maksimum yang dihasilkan oleh manusia saat berbicara normal (*normal speech*).

Perubahan tingkat intensitas suara terhadap fungsi waktu (*decay time*) akan tergambar pada kertas berskala lebar hingga 50 dB (*range potentiometer*) dan bergerak dengan kecepatan 10 mm/det (*paper speed*). Waktu dengung dapat dibaca dengan bantuan Protractor SC 2361.

Untuk menjaga validitas hasil pengukuran lapangan, kalibrasi internal dilakukan dengan alat penghasil suara (*acoustics calibrator* RION tahun 1979) bersifat stabil yang dipasangkan pada *microphone* dari SPL sebagai pengganti sumber suara. Selanjutnya, jarum penunjuk pada SPL disesuaikan dengan intensitas suara (94 dB pada 1000 Hz) seperti yang dihasilkan oleh *signal generator*.

Simulasi Ecotect sebagai Pendekatan Desain Akustik

a. Konstruksi Model

Pengerjaan simulasi akustik dengan program Ecotect dimulai dari membangun model denah ruang dengan program Autocad. Selanjutnya, dilakukan pemindahan (*import*) ke Ecotect. Dari gambar denah pada Ecotect dilakukan penarikan garis-garis tiga dimensi dengan menggunakan fasilitas *extrude*. Kemudian, bidang-bidang plafond dapat dikonstruksikan dengan fasilitas gambar bidang (*plane*), yang dilanjutkan dengan membangun ruang termal (*thermal zone*). Karena analisa yang akan dilakukan adalah analisa akustik ruang maka bentuk model yang dibutuhkan hanya berupa bentuk ruang interiornya saja.

b. Setting Simulasi

Setelah model ini siap, beberapa *boundary conditions* untuk melaksanakan simulasi dimasukkan seperti tertera di bawah ini:

1. Sumber suara yang dipakai adalah sebuah speaker yang berkarakteristik umu dengan kekuatan suara sebesar 80 db sesuai pembangkit suara yang dilakukan pada saat pengukuran lapangan.

Tabel 2. Tabel Koefisien Serap Material yang Dipakai

No.	Material	Frekuensi Suara								
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
1	Gypsum_Board_1_2_in_suspension_system	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.9	0.9
2	Acoustical_Board_3_4_in_suspension_system	0.3	0.3	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
3	ConcFlr_Tiles_Suspended	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
5	SingleGlazed_TimberFrame_5mm	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
6	BrickPlaster_smooth	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

2. Bidang-bidang ruang diisi dengan properti akustikal sebagai berikut:

c. Simulasi dengan Metode Statistik

Kalkulasi dengan metode statistik didasarkan pada rumus-rumus Sabine, Eyring dan Millington atau disebut sebagai cara ‘*statistical reverberation*’ . Semua rumus tersebut kemudian dapat diaplikasikan untuk setiap band oktaf suara dan dilengkapi dengan fasilitas untuk melihat efek tempat duduk dan jumlah pemakai.

Jumlah pemakai ruang yang ditetapkan sebesar 400 orang dengan tipe kursi bahan keras (*hardbacked*). Untuk semua model dilakukan variasi jumlah pemakai dengan memasukan nilai pemakai 0%, kemudian untuk empat model terpilih dimasukkan sebesar 50% dan 100%.

d. Simulasi dengan Metode Acoustic Particles

Untuk melaksanakan kalkulasi *existing acoustic particles* dijalankan dengan cara penyebaran acak bersudut datar 90 dan sudut tegak 90 menghadap ke ruang pendengar. Jumlah garis suara yang dibangkitkan untuk setiap kalkulasi sebesar 1000 unit (diasumsi sebanding luasan bidang) dengan jumlah pantulan sebanyak 20 kali (normal pantulan berkisar 8 – 32 pantulan – Ecotect document,2003).

Beberapa asumsi-asumsi tersebut dilakukan untuk penyederhanaan kejadian akustik (*acoustic phenomena*), seperti terperinci di bawah ini:

1. Untuk bentuk bidang yang komplek akan disederhanakan sebagai sebuah series bidang planar poligonal.
2. Penyebaran suara dianggap sebagai sebuah paket energy (*small sound quanta*) yang berjalan dengan gerakan lurus.
3. Energi suara dalam hal ini merupakan sebuah fungsi matematis yang dapat dikalkulasi.
4. Berhubungan dengan penomena gelombang maka *phasing* dan *interference* antar gelombang tidak diperhitungkan.
5. Koefisien serap bahan tidak diperhitungkan terhadap sudut jatuh garis suara.

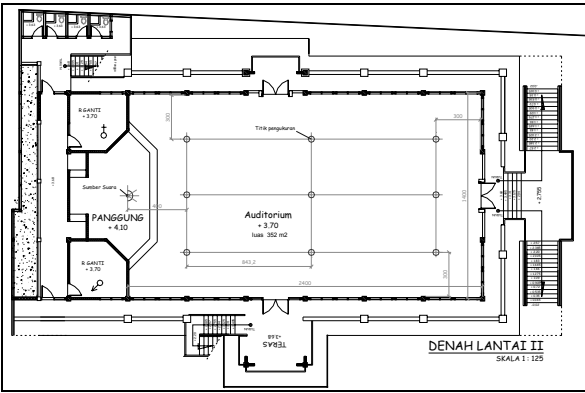
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Lapangan

Hasil pengukuran lapangan menunjukkan RT60 rata-rata pada frekuensi 500-2000 Hz cukup baik untuk ruang auditorium dengan penekanan fungsi untuk pidato, yang mensyaratkan RT60 sebesar 0,5 - 1 detik, tetapi kurang tinggi untuk auditorium multifungsi (untuk fungsi musik yang mensyaratkan $1,6 \leq RT60 \leq 1,8$).

RT60 rata-rata pada frekuensi 250 Hz terlalu tinggi untuk ruang pidato. Nilai RT60 pada titik 3, 4, dan 6 yang berlebihan (> 2 detik) mungkin disebabkan oleh peralatan yang kurang akurat pada frekuensi rendah, yang ditunjukkan oleh besarnya perbedaan *steady broadband noise* pada beberapa titik pengukuran.

Besarnya RT60 pada semua titik, kecuali pada frekuensi 250 Hz, cukup merata. Selisih nilai RT60 maksimal terhadap RT60 minimal pada frekuensi 500 Hz sebesar 0,15 detik, pada frekuensi 1000 Hz sebesar 0,15 detik, dan pada frekuensi 2000 Hz sebesar 0,15 detik. Rata-rata selisih nilai RT60 pada setiap titik ukur terhadap nilai RT60 rata-rata sebesar 0. Hasil pengukuran RT60 pada setiap titik ukur dan setiap frekuensi menunjukkan kecenderungan nilai RT60 yang relatif kecil di tengah-tengah ruangan.



Gambar 2. Posisi Titik Pengukuran

Tabel 4. Tabel Nilai RT60 pada Setiap Titik Pengukuran dan Frekuensi Suara (detik)

Frekuensi	1	2	3
250 Hz	1.67	1.90	2.20
	2.10	1.40	2.62
	1.84	1.53	1.75
Frekuensi	1	2	3
500 Hz	0.83	1.15	0.80
	0.95	0.77	0.90
	0.89	0.83	0.97
Frekuensi	1	2	3
1000 Hz	0.77	0.78	0.70
	0.75	0.70	0.75
	0.76	0.75	0.85
Frekuensi	1	2	3
2000 Hz	0.83	0.80	0.78
	0.80	0.68	0.77
	=0.75	0.75	0.63

Hasil Studi Simulasi dan Validasi

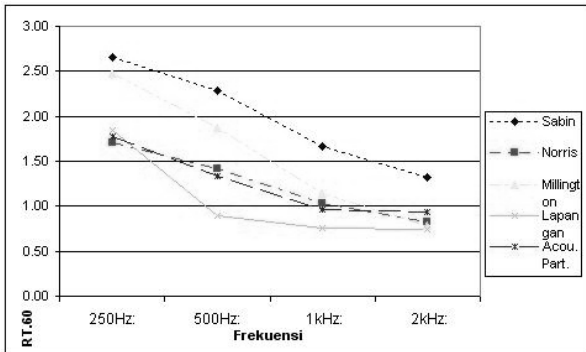
Tabel 5 menunjukkan bahwa RT60 yang dihitung dengan menggunakan rumus Eyring dan

acoustic paticles memiliki nilai yang paling mendekati terutama untuk frekuensi 250 Hz dan 2 kHz dan yang paling menyimpang pada frekuensi 500 Hz. Secara umum penyimpangan yang lebih tinggi ini mungkin karena beberapa hal, seperti masih kurang tepatnya nilai koefisien serap yang dimasukkan dan tidak adanya *background noise* simulasi, sementara sumber suara tetap dianggap sama sebesar 80 db serta faktor *phasing* dan *inteference* antar gelombang suara yang tidak diperhitungkan.

Tabel 5. Nilai RT60 Model Eksisting

Bid. Abs.	Frek.	Sabin	Norris	Millington	Lapangan	Acou. Part.	Waktu
93.502	250Hz:	2.66	1.70	2.48	1.84	1.78	det.
110.195	500Hz:	2.28	1.42	1.87	0.89	1.34	det.
147.233	1kHz:	1.67	1.03	1.14	0.76	0.96	det.
182.554	2kHz:	1.32	0.82	0.78	0.75	0.94	det.
Average		1.98	1.24	1.57	1.06	1.25	det.
% terhdip lapangan		87%	17%	48%	0%	18%	

Meninjau nilai persyaratan RT60 yang dibutuhkan untuk fungsi pidato, terlihat dari Gambar 3 baik nilai RT60 yang dihasilkan dari rumus Sabin, Eyring, Millington maupun *acoustic paticles* masih relatif tinggi untuk auditorium dengan penekanan kegiatan pidato yang berkisar antara 0,5 hingga 1,0 detik pada frekuensi 500 Hz



Gambar 3. Nilai Waktu Dengung Dari Hasil Simulasi Dan Lapangan

Terlihat juga perhitungan dengan rumus Sabine cenderung menunjukkan nilai waktu dengung yang paling tinggi pada setiap frekuensi suara dibandingkan dengan kedua rumus statistik yang lain dan menyimpang hingga 87% dari pengukuran lapangan. Rumus Millington yang lebih tepat dan akurat untuk diterapkan pada koefisien serap rata-rata >0,2 dan ≠ 0 menghasilkan nilai RT60 pada frekuensi rendah yang relatif tinggi. Nilai RT60 yang dihasilkan menyimpang sebesar 48% terhadap hasil pengukuran lapangan. Hasil perhitungan waktu dengung dengan rumus Eyring paling mendekati hasil pengukuran lapangan dengan penyimpangan rata-rata hanya

sebesar 17%. Perbedaan penerapan ketiga rumus di atas, kemungkinan terletak pada besarnya total koefisien serap serta faktor geometri ruang. Sesuai teori, rumus Sabin kurang cocok untuk nilai total koefisien > 20%, sedang keakuratan hasil Eyring lebih daripada Millington, dapat dikarenakan rumus Eyring yang lebih cocok untuk kasus akustik dengan penyebaran suara dalam ruang yang merata, yang biasa terjadi pada bentuk rancangan ruang yang tidak terlalu kompleks seperti dalam kasus ini.

Satu hal yang menarik dari hasil di atas (pada Gambar 3), yaitu hasil kalkulasi secara *acoustic paticles* yang memperlihatkan hasil yang cukup signifikan, dengan garis *trend* yang serupa dengan perhitungan Eyring dengan penyimpangan lebih tinggi 18 % dari pengukuran lapangan atau 1% di atas hasil Eyring. Dari hasil ini terlihat simulasi cukup signifikan di dalam memperhitungkan aspek geometri ruang. Hal ini dapat memberi harapan yang lebih baik di dalam kalkulasi akustik ruang terutama untuk ruang-ruang yang kompleks serta besar volumenya, yang pada umumnya kurang akurat apabila dihitung dengan rumus-rumus *statistical reverberation*.

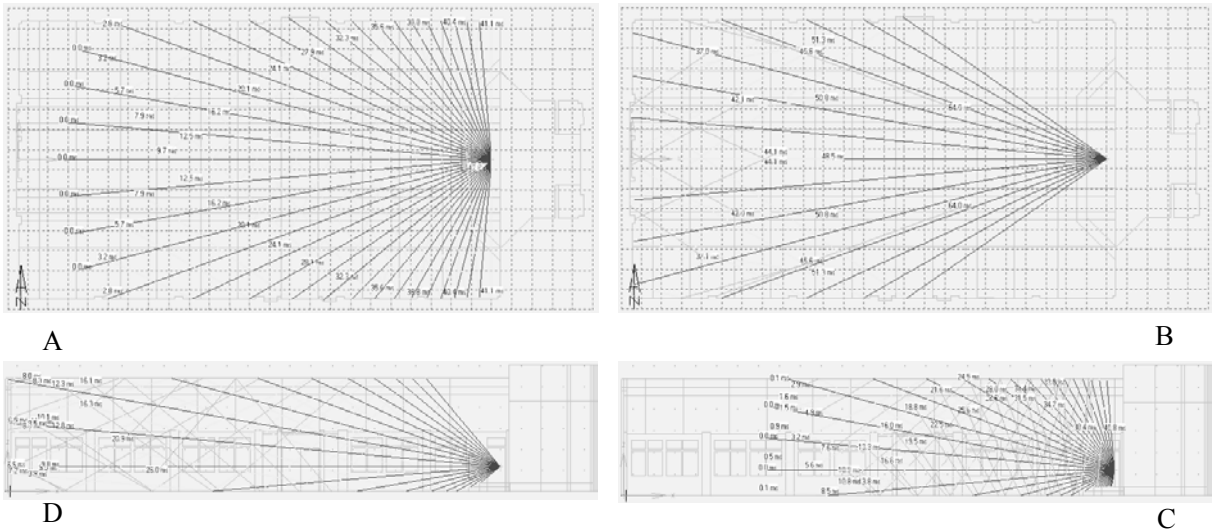
Selanjutnya berdasar pada hasil simulasi di atas, maka analisis waktu dengung secara statistik pada model-model berikutnya akan dilakukan dengan rumus Eyring dan *acoustic paticles*.

Perancangan Ulang Waktu Dengung Auditorium dengan Acoustic Particles

a. Acoustic Particles sebagai metode simulasi energi suara

Untuk mengakomodasi kebutuhan penganalisa-an pengaruh posisi bidang serap terhadap waktu dengung, maka model kombinasi khusus dengan memperhatikan perjalanan suara dibangun. Model ini disebut sebagai model ‘Design’. Dengan menggunakan fasilitas *Linked Acoustic Rays*, perjalanan suara dalam ruang dapat dilacak dan dipakai untuk menentukan bidang-bidang ruang yang akan didesain sebagai bidang pantul atau serap.

Penentuan bidang serap yang akan dipasang didasarkan pada dua pertimbangan. Pertama, mengurangi panjang perjalanan suara dengan meredam energinya sehingga garis suara yang memiliki kemungkinan terpantul berulang karena dua bidang pantul yang rapat (ruang dengan bentuk empat persegi panjang) akan diserap guna menghindari efek gaung atau gema. Kedua, suara pantul diharapkan tiba pada pendengar selambat-lambatnya dengan waktu tempuh 50 mdet dan telah melemah energinya guna meningkatkan *speech level* dan *speech intelligibility* serta mengurangi ketegangan suara hasil saling bertabrakan maupun pengaburan suara (*blurr*).



Gambar 4. Potongan Horisontal Dan Vertikal Pantulan Suara Dari Hasil Simulasi Dengan Pendekatan Perjalanan Suara

Terlihat dari Gb. 4A garis suara yang bergerak horisontal ke arah samping depan akan terpantul dengan sudut yang runcing dan memiliki kemungkinan untuk terpantul berulang pada bidang dinding yang berhadapan. Untuk hal itu maka bidang samping kiri (SDKR) dan samping kanan (SDKN) akan dikonstruksikan dengan bahan serap suara. Selanjutnya memperhatikan garis suara yang jatuh pada bidang dinding belakang (BLK), terlihat dari Gb. 4B waktu tempuh suara pantul berkisar 35 mdet hingga 48 mdet. Nilai ini mendekati batas waktu tempuh yang diinginkan. Supaya energi suara pantul melemah (sekaligus mengurangi waktu tempuh), maka pada dinding BLK akan dikonstruksikan dengan bahan serap. Memperhatikan garis suara secara vertikal, kembali terlihat dari Gb. 4C dan Gb. 4D, suara yang jatuh pada bidang lantai atau plafond di bagian dekat podium mempunyai kemungkinan terpantul secara berulang pada kedua bidang tersebut. Demikian pula, garis suara yang jatuh pada lantai dan plafond dekat dinding belakang akan terpantul berulang ke plafond atau lantai kemudian ke dinding BLK dan kembali ketengah ruang dengan waktu tempuh berkisar 34 hingga 40 ms.

Untuk mengatur garis suara tersebut maka sebagian bidang plafond dan lantai di bagian depan dan podium serta dinding podium dikonstruksikan dengan bahan serap. Bidang plafond dan dinding samping kiri dan kanan belakang juga dikonstruksikan dengan bahan yang sama. Sedang untuk sebagian lantai belakang dekat dinding BLK tidak dikonstruksi dengan bahan serap dengan pertimbangan perjalanan suara telah terhambat oleh pemakai yang duduk didalam ruang.

b. Hasil dan Analisis Waktu Dengung

Tabel 6. Nilai RT60 Hasil Simulasi dengan Metode Norris

Freq.	Eksisting	Ceiling	W-F	C-F	Design	Time
250Hz:	1.74	1.39	1.34	1.37	1.38	det
500Hz:	1.44	0.98	1.18	0.94	1.12	det
1kHz:	1.04	0.67	0.87	0.64	0.79	det
2kHz:	0.83	0.54	0.68	0.51	0.62	det
Average	1.26	0.90	1.02	0.87	0.98	det
Pnr 17%	1,05	0.74	0.45	0.72	0.81	det

Tabel 7. Nilai RT60 Hasil Simulasi dengan Metode Acoustic Particles

Freq.	Eksisting	Ceiling	W-F	C-F	Design	Time
250Hz:	1.78	1.19	1.06	0.89	0.94	det
500Hz:	1.34	0.64	0.81	0.53	0.62	det
1kHz:	0.96	0.71	0.60	0.60	0.43	det
2kHz:	0.94	0.96	0.49	0.90	0.35	det
Average	1.26	0.88	0.74	0.73	0.59	det
Pnr 18%	1,03	0,72	0,61	0,60	0,48	det

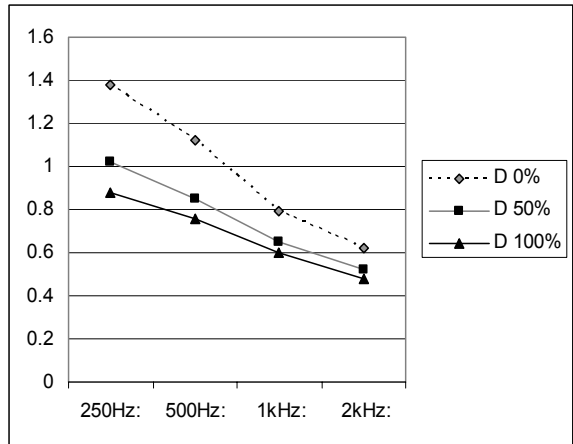
Penambahan/penggantian material serap pada bagian-bagian tertentu berdasarkan perilaku energi suara terhadap geometri ruang (model Design) juga menghasilkan nilai RT60 optimum terutama untuk frekuensi tinggi, bahkan apabila telah dilakukan kalibrasi (turun 17%) nilai rata-rata menjadi signifikan. Nilai RT60 untuk model Desain sebenarnya masih dalam jangkauan nilai optimum untuk pidato. Namun apabila hasil kalibrasi dibaca maka nilai tersebut menjadi kurang memenuhi syarat, perlu adanya pengurangan bidang serap dengan mengkaji ulang analisa *link acoustic rays*-nya secara lebih detail.

c. Pengaruh Jumlah Pemakai pada Nilai Waktu Dengung

Simulasi variasi jumlah pemakai ini juga memperlihatkan tingkat fleksibilitas model terhadap perubahan jumlah pemakai. Pemakaian penuh ruangan yang telah dirancang ulang akustiknya masih menghasilkan RT60 pada frekuensi 500 Hz yang memenuhi standar untuk ruang pidato. Jumlah pemakai memberikan penurunan yang lebih besar pada frekuensi rendah (250 Hz) karena koefisien serap yang tinggi dari pemakai (dan kursi) pada frekuensi rendah.

Tabel 8. Nilai RT60 untuk Variasi Jumlah Pemakai

Freq.	D 0%	D 50%	D 100%
250Hz:	1.38	1.02	0.88
500Hz:	1.12	0.85	0.76
1kHz:	0.79	0.65	0.6
2kHz:	0.62	0.52	0.48
Average	0.98	0.76	0.68

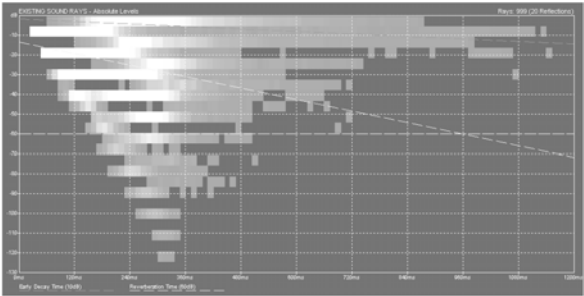


Gambar 5. Grafik Penurunan Nilai RT60 pada Kondisi Jumlah Pemakai 50% dan 100%

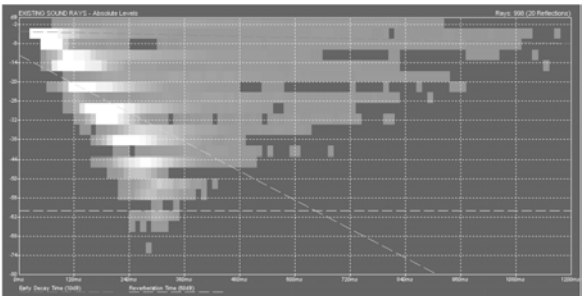
d. Hasil dan Analisis Distribusi Suara

Kajian distribusi suara dilakukan dengan mengamati grafik penyebaran energi suara yang diistilahkan dengan *homogeneity* yang dihasilkan dengan metode *existing acoustic particles*. Dua model tambahan yang dipilih, yaitu model Eksisting dan Plafond, digunakan sebagai pembanding hasil simulasi model Desain.

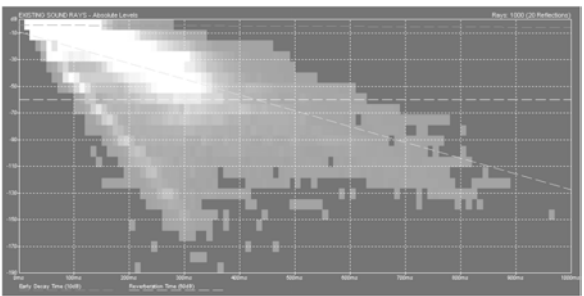
Standar penyebaran energi suara digambarkan pada area dengan 2 garis hijau sebagai batas. Terindikasi pada ketiga model, terdapat banyak garis suara berada di luar garis hijau terutama pada area di atas garis hijau 1 detik. Hal ini menunjuk bahwa penyebaran energi suara belum merata untuk ketiga model tersebut dan masih banyak energi suara dengan waktu dengung lebih dari 1 detik.



Gambar 6. Grafik Penyebaran Energi Suara Model Eksisting



Gambar 7. Grafik Penyebaran Energi Suara Model Plafond

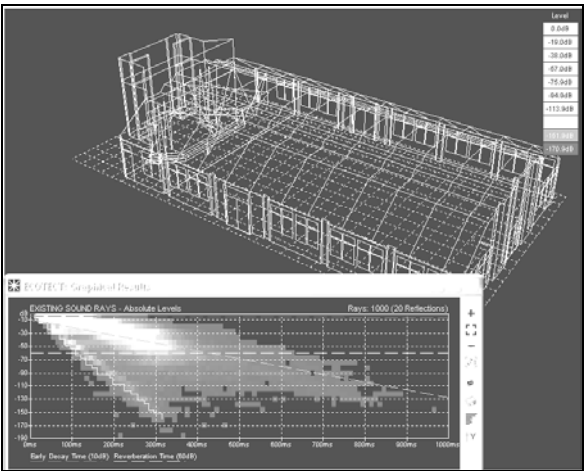


Gambar 8. Grafik Penyebaran Energi Suara Model Desain

Mengamati lebih detail untuk model Eksisting dan Plafond yang memiliki rata-rata RT60 berkisar antara 0.88-1.25 detik atau berkisar 0.77-1.03 detik setelah dikalibrasi, nampak bahwa Kalkulasi RT.60 saja tidak cukup memberi hasil yang optimum. Metode ini menunjukkan bahwa hanya sebagian luasan ruang yang optimum dan sebagian area ruang ternyata masih menciptakan waktu dengung yang terlalu panjang atau terlalu pendek.

Mengamati hasil model Desain dengan nilai RT60 rata-rata cukup rendah yaitu 0.58 atau 0.48 detik setelah kalibrasi yang tampak dari hasil penyebarannya yang lebih sempit (lihat garis merah muda pada Gambar 6) dari kedua model sebelumnya terutama untuk waktu dengung >1 detik. Hal ini menunjukkan bahwa analisa penempatan bidang-bidang serap akan memberi hasil yang lebih optimum daripada sekedar perhitungan luasan bidang serap. Namun karena hasil RT60 sangat rendah maka model

ini harus diperbaiki dengan mengurangi luasan bidang serap. Untuk hal ini Ecotect juga menyediakan fasilitas *link decay rate to geometry path* yang berguna untuk melihat posisi garis dan titik jatuh pantulan dalam model tiga dimensi. Fasilitas ini (Gambar 9) berupa garis kuning dalam jendela depan dipilih (garis kuning tebal menunjukan garis suara dengan RT yang rendah). Desain dapat dilakukan pada bagian plafond depan dengan kuantiti secara coba-coba, sehingga diperoleh nilai yang optimum.



Gambar 9. Grafik Analisis Perbaikan Penyebaran Energi Suara (*link decay rate to geometry path*)

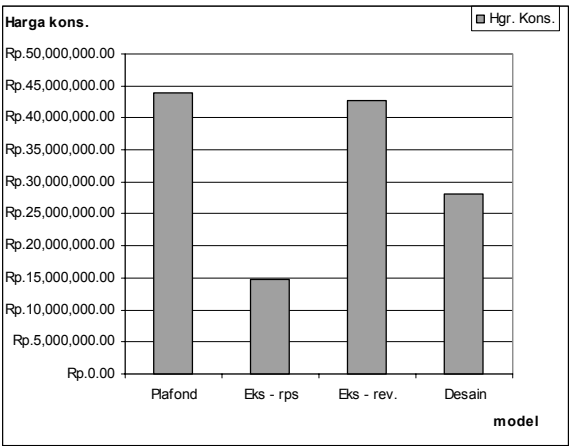
e. Analisis Aspek Biaya

Tampak dari Tabel 9 dan Gambar 10, model Eksisting membutuhkan biaya yang termurah, namun nilai RT60 masih cukup tinggi (1.24 detik Eyring dan 1.25 detik Acoustic particles), sedang untuk model Plafond dapat memberi RT60 yang optimum (0.90 detik Eyring dan 1.88 detik Acoustic particles) membutuhkan anggaran yang cukup banyak yaitu Rp43.854.300,-.

Satu model terakhir, model Desain terindikasi memberi nilai yang optimum baik untuk RT60 maupun nilai kontruksi sebesar 25% lebih murah dari model Plafond. Meskipun luasan bidang serap model eksisting lebih kecil 20% dari model plafond, harga konstruksi model ini lebih rendah yang disebabkan tidak semua luasan bidang dikonstruksikan dengan bahan serap yang relatif tinggi harganya. Hal ini menunjukan bahwa perencanaan yang matang untuk menempatkan bidang-bidang serap dan penyesuaian harga konstruksi dapat membantu pengoptimalan rancangan ruang akustik. Penempatan material serap secara efisien dan efektif memberikan keunggulan bagi alternatif desain. Perencanaan seperti pada model Desain akan memberi kesempatan yang lebih leluasa bagi arsitek untuk menata interior ruang. Terlihat di sini fungsi estetika juga merupakan keuntungan lain, disamping secara teknik dan finansial.

Tabel 9. Harga Konstruksi Pada Setiap Model

Harga Konstruksi per meter2			
Acoustic Brd Rk. Almunium - Plaf.	:	Rp.	105,000.00
Acoustic Board Rk. Kayu-Din.	:	Rp.	90,000.00
Pelapis Carpet - Lantai	:	Rp.	45,000.00
Bidang	Area	%	Hgr. Kons.
Plafond	417.66	35.96%	Rp. 43,854,300.00
Eks - rps	164.63	14.17%	Rp. 14,816,448.00
Eks - rev.	406.55	35.00%	Rp. 42,688,101.75
Desain	336.76	28.99%	Rp. 28,156,260.00



Gambar 10. Harga Konstruksi untuk Setiap Model

KESIMPULAN

- Hasil pengukuran lapangan menunjukkan nilai RT60 rata-rata pada kondisi eksisting Auditorium Gereja Kumetiran dalam keadaan kosong sedikit lebih tinggi untuk fungsi akustik pidato dan bebas gaung. Diharapkan pemakaian ruang dengan jumlah pemakai sebanyak minimal 50% dapat memperbaiki performa nilai RT60 menjadi lebih pendek hingga pada nilai optimum. Faktor dimensi ruang auditorium yang memenuhi persyaratan ruang akustik dengan hasil pengukuran waktu dengung pada ke-9 titik yang tersebar secara relatif merata.
- Membandingkan hasil pengukuran lapangan dengan hasil simulasi RT60 untuk model yang sesuai eksisting ruang Auditorium baik secara *reverberation statistical* maupun *existing acoustic particles (ray tracing)* menunjukan hasil yang cukup signifikan dan valid dengan penyimpangan berkisar 17% dan 18%urut sesuai metode tersebut.
- Hasil simulasi dengan metode *existing acoustic particles* memperlihatkan hasil kalkulasi RT60 mendekati hasil pengukuran lapangan dengan penyimpangan sebesar 1% di atas kalkulasi metode Eyring. Berdasarkan hasil simulasi metode

existing acoustic particles juga teridentifikasi bahwa metode ini dapat melacak efek posisi dan luasan bidang serap terekspose sehingga perhitungan RT60 diharapkan dapat menghasilkan nilai yang lebih realitis.

- Keberhasilan perhitungan RT60 yang memper-
timbangkan efek geometri ruang di atas, selain
memberi peluang untuk perhitungan RT yang
optimum juga memberi keuntungan perancangan
konstruksi ruang akustik yang efektif baik dari
segi pemilihan bahan, harga maupun keleluasaan
di dalam penyesuaian segi estetika desain interior.

DAFTAR PUSTAKA

- Barron, Michael, *Auditorium Acoustic and Archite-
ctural Acoustics*, London: E & FN Spon, 1993.
- Cox, Trevor, *Acoustics Laboratory: Lab Session 4,
Reverberation Time and Absorption*, Man-
chester: University of Salford, 2004.
- Everest, F. Alton, *The Master Handbook of Acoustics
2nd Edition*, Washington: Tab Books Inc, 1988.
- Istiadji, Agustinus Djoko dan Floriberta Binarti, *Studi
Simulasi Komputer sebagai Pendekatan
Desain Akustik Auditorium*, Laporan Pene-
litian 2006 Universitas Atma Jaya Yogyakarta,
Yogyakarta. 2006.
- Laboratorium Akustik dan Getaran Mekanis, “Buku
Petunjuk Praktikum Getaran Mekanis”, Yog-
yakarta: Jurusan Teknik Mesin FT-UGM.
- Lord, Peter, Duncan Templeton, *Detailing for
Acoustic*, Van Nostrand Reinhold, 1996.
- Marsh, Andrew, *Ecotech v.5.20*, Cardiff: Welsh
School of Architecture at Cardiff University,
2003.
- Mehta, Madan, James Johnson, dan Jorge Rocafort,
*Architectural Acoustics: Principles and
Design*, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1999.
- Neubauer, Reinhard O., *Prediction of reverberation
time in rectangular rooms with non uniformly
distributed absorption using a new formula*,
Ingolstadt, 2000.
- Smith, B J, R J Peters and S Owen, *Acoustics and
Noise Control*, Edinburgh gate: Addison Wes-
ley Longman Limited, 1996.