

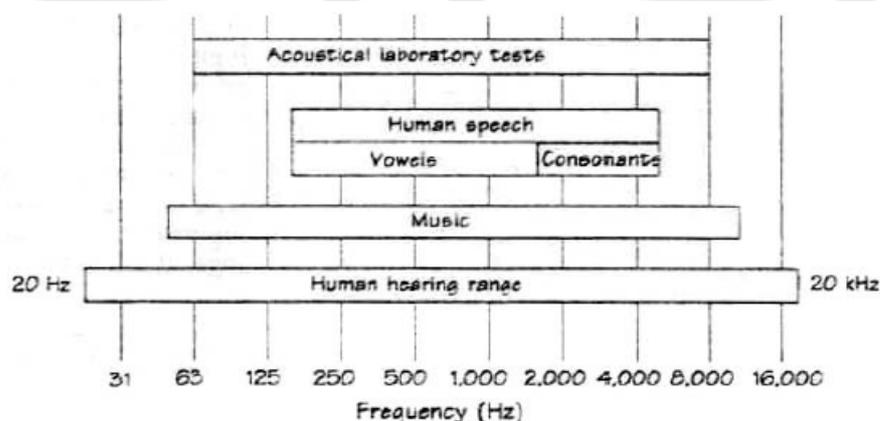
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Bunyi pada Fungsi Pidato dan Musik

Bunyi adalah gelombang getaran mekanis dalam udara atau benda padat yang masih bisa ditangkap oleh telinga manusia, dengan rentang frekuensi 20 - 20,000Hz. Sedangkan suara adalah bunyi manusia (Satwiko, 2009). Pada udara dengan temperatur normal kecepatan perambatan bunyi berkisar 344m/s. Tinggi rendah bunyi dideskripsikan oleh panjang gelombangnya, frekuensi atau banyaknya satu panjang gelombang per-satuan waktu (detik), dan bentuk gelombangnya.

$$\text{Kecepatan bunyi (C)} = \text{Frekuensi (f)} \times \text{Panjang gelombang (\lambda)}$$

Atribut bunyi yang dapat dirasakan sensasinya dan membuat manusia dapat menentukan tinggi rendahnya frekuensi bunyi disebut pitch. Semakin tinggi frekuensi bunyi maka semakin tinggi *pitch*-nya (Doelle, 1972).



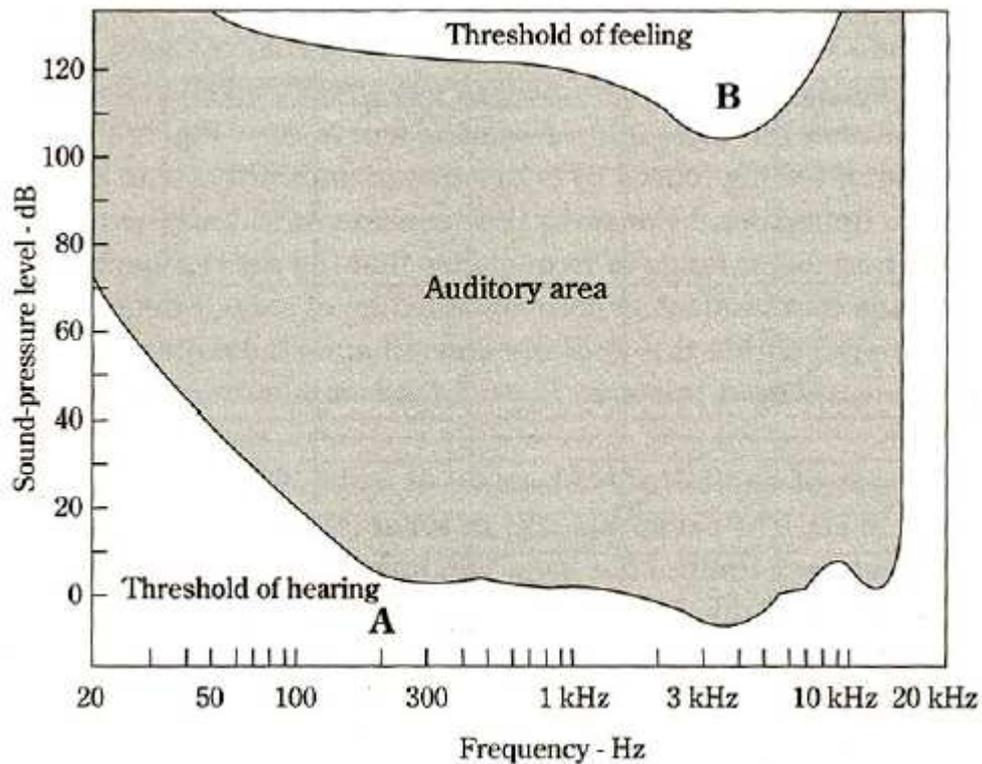
Gambar 3: Rentang frekuensi bunyi manusia, musik, dan percobaan laboratorium (Mehta, Johnson & Rocafort 1999).

Panjang gelombang adalah jarak posisi normal dari amplitudo maksimal dan minimal. Amplitudo adalah jarak terjauh deviasi maksimal atau minimal dari garis atau titik normal. Pada suhu normal panjang gelombang frekuensi bunyi 20Hz adalah 17 meter sedangkan frekuensi 20kHz adalah 0,02 meter. Gelombang bunyi frekuensi rendah akan berbelok setelah melewati penghalang, berbeda dengan bunyi frekuensi tinggi akan menciptakan bayang-bayang bunyi. Bunyi dengan frekuensi tinggi ($2\text{kHz} < X$) akan lebih menyebar pada sumbu longitudinal, sumber bunyi sedangkan bunyi frekuensi menengah ($250\text{Hz} < X < 2\text{kHz}$) dan frekuensi rendah ($X < 250\text{Hz}$) akan menyebar dengan merata ke semua arah.

Tabel 1: Frekuensi bunyi dan panjang gelombangnya (Cowan, 2000)

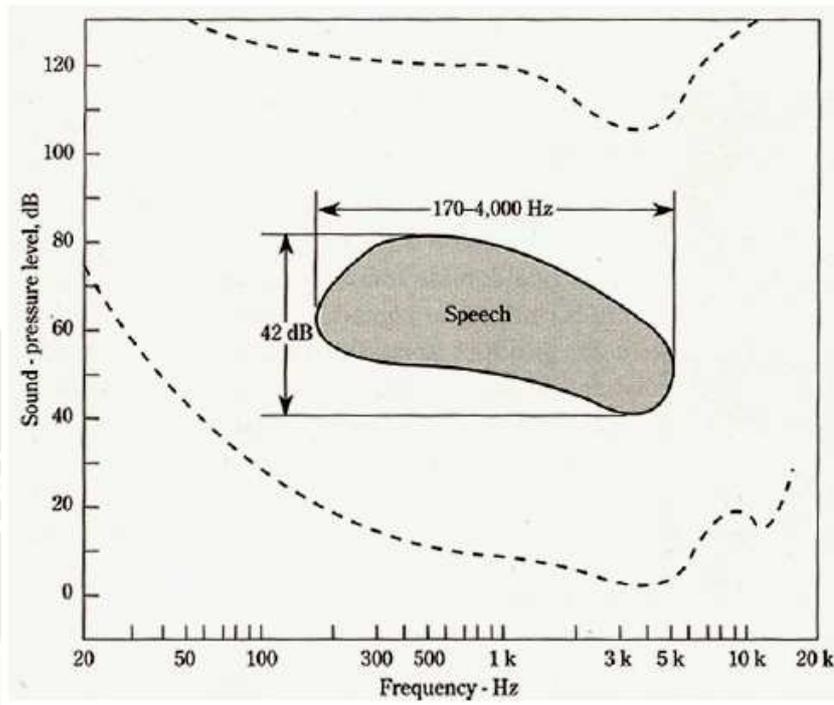
Frequency (Hz)	Wavelength
20	17m
50	7m
100	3m
500	0,7m
1000	0,3m
5000	0,07m
10000	0,03m
20000	0,02m

Konsep berikutnya yaitu intensitas dan kekuatan bunyi. Keduanya memiliki keterkaitan yang proporsional. Semakin besar intensitas semakin besar kekuatan bunyi. Telinga manusia memiliki rentang sensitifitas terhadap level kekuatan bunyi/*Sound Pressure Level* (SPL) dan diukur dengan satuan *decibel* (dB). Sensifitas telinga terhadap kekuatan bunyi juga dipengaruhi frekuensi bunyi (Gambar 4).

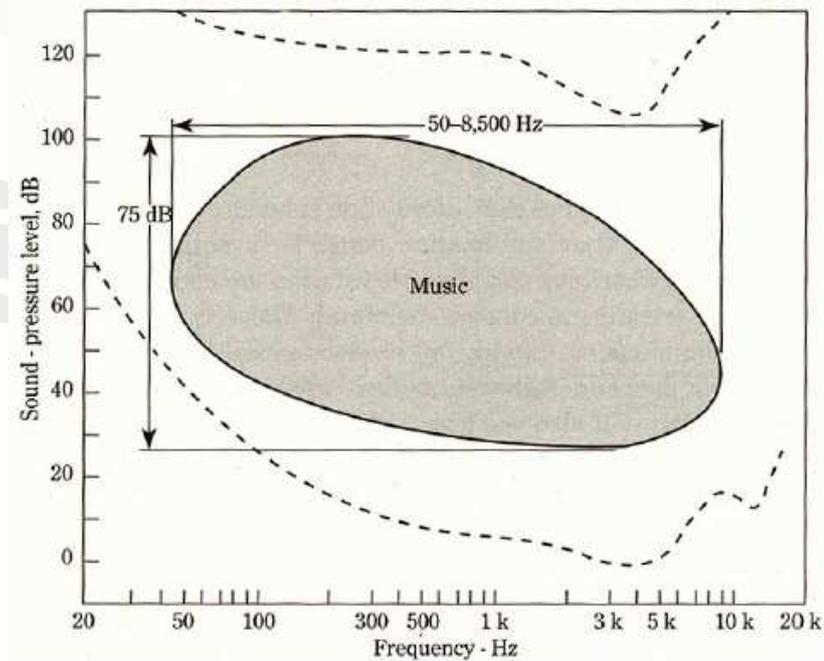


Gambar 4: Batas sensitifitas telinga manusia terhadap kekuatan bunyi (SPL) dikaitkan dengan frekuensi bunyi (Everest, 2001)

Pada kegiatan pidato (*speech*) rentang frekuensi bunyi yang dihasilkan adalah 170Hz – 4000Hz dengan kekuatan bunyi 40dB – 80dB. Sedangkan pada musik rentang frekuensi yang dihasilkan adalah 50Hz – 8500Hz dengan kekuatan bunyi 30dB – 100dB. Dengan demikian dapat digambarkan keterkaitan antara sensitifitas kekuatan bunyi dan frekuensi-nya pada Gambar 5 dan Gambar 6. Pada umumnya evaluasi kualitas bunyi untuk pidato dilakukan pada frekuensi 500Hz dan 1000Hz sedangkan untuk musik pada rentang frekuensi 63Hz sampai 8000Hz. Rentang dinamik frekuensi bunyi untuk musik lebih lebar dibandingkan untuk percakapan atau pidato.

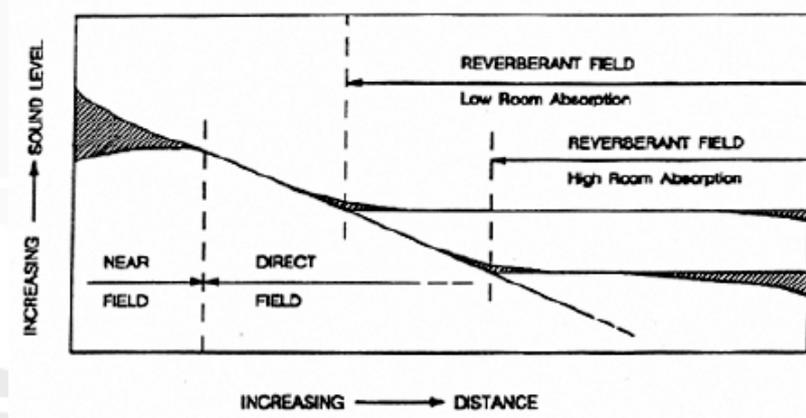


Gambar 5: Proporsi kekuatan bunyi dikaitkan dengan frekuensi-nya pada rentang sensitifitas pendengaran manusia untuk pidato. (Everest, 2000)



Gambar 6: Proporsi kekuatan bunyi dikaitkan dengan frekuensi-nya pada rentang sensitifitas pendengaran manusia untuk musik. (Everest, 2000)

Pada ruang dalam, terdapat dua jenis bunyi yang diterima pendengar yaitu bunyi langsung dan bunyi pantulan. Bunyi pantulan baik dari lantai, dinding dan plafon akan bercampur dengan bunyi langsung yang juga terus dihasilkan oleh sumber bunyi. Percampuran ini dalam ruang disebut bidang bunyi *reverberant*. dalam bidang ini tingkatan bunyi akan konstan dalam ruang tidak dipengaruhi jauh dekatnya posisi pendengar (Cavanaugh & Wilkes, 1999). Pengaruh interaksi antara bunyi yang dekat dengan sumber, bunyi langsung dan bidang reverberant pada kekuatan bunyi di dalam ruang dengan beragam material penyerap bunyi dapat diamati pada Gambar 7.



Gambar 7: Interaksi antara bunyi yang dekat dengan sumbernya, bunyi langsung, dan bidang *reverberant* (Irvine & Richards, 1998).

Bunyi yang keluar dari sumber (*near field*) dan bunyi langsung (*direct field*) tidak dipengaruhi oleh banyak tidaknya tingkat serapan ruang tetapi pada penurunan level bidang *reverberant* sangat terlihat dampaknya. Pada ruang yang sangat besar dengan tingkat serapan bunyi yang tinggi, bidang *reverberant* tidak akan seragam atau beraturan, tetapi akan berkurang seiring jarak dari sumber bunyi (Templeton, 1987).

B. Parameter Kualitas Akustik Ruang untuk Olah raga, Pidato dan Musik

1. Waktu Dengung (Reverberation Time - RT_{60})

Salah satu faktor penentu kualitas akustika ruang adalah waktu dengung ruang (RT_{60}). RT_{60} adalah lama waktu (detik) yang dibutuhkan ruang untuk mengurangi energi bunyi dari sumber bunyi sebanyak 60 dB (Satwiko, 2009). Waktu dengung terlalu pendek akan menyebabkan ruangan ‘mati’, sebaliknya waktu dengung yang panjang akan memberikan suasana ‘hidup’ pada ruangan (Satwiko, 2009). Menentukan rentang waktu dengung yang tepat untuk berbagai fungsi dapat dilakukan sebagai langkah awal untuk memberikan pedoman dalam penelitian. Waktu dengung ruang dapat ditentukan dengan melihat fungsi akustika ruang (Gambar 8). Waktu dengung ruang juga dapat diprediksi dengan menggunakan formula Sabine.

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{Sa}$$

RT_{60} : Waktu dengung

V : Volume ruang

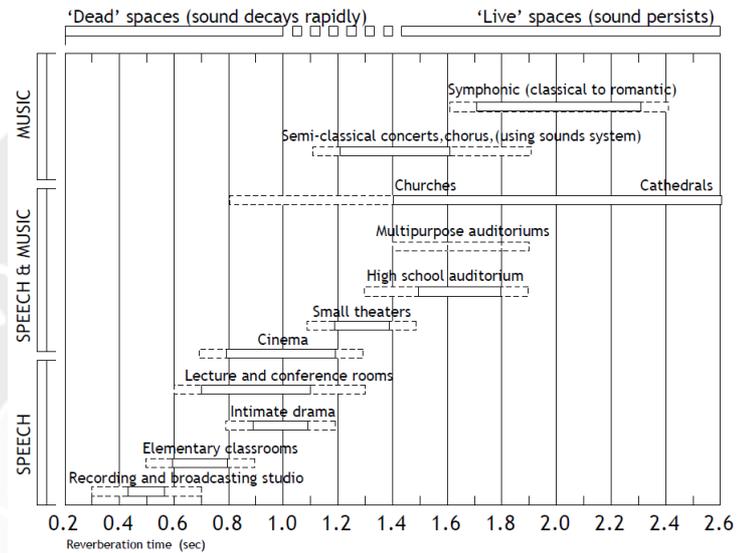
S : Luasan area permukaan ruang

α : Rata-rata koefisien serap ruang

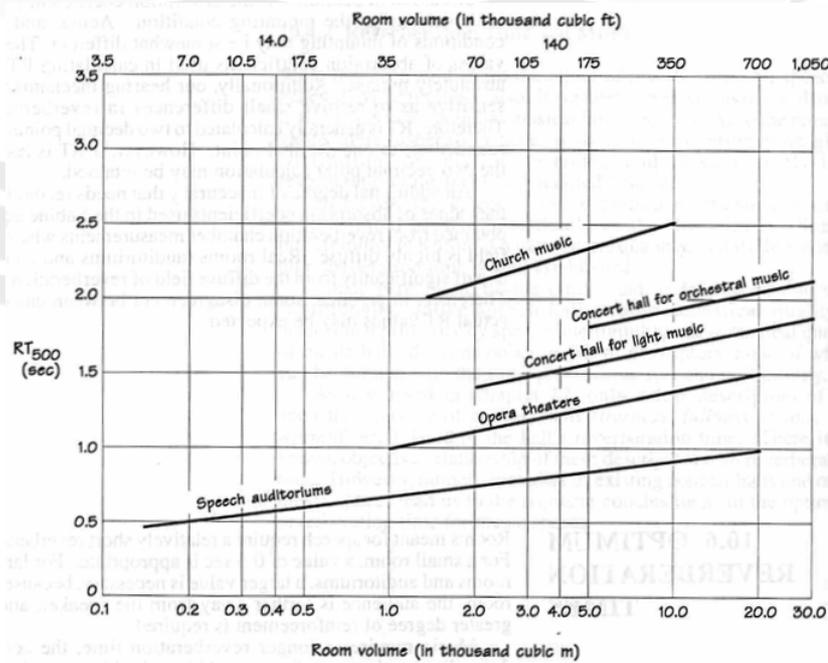
$S\alpha$: Total penyerapan ruang dalam “Sabine”

Dari persamaan dapat dilihat volume ruang memiliki pengaruh dalam menentukan RT_{60} sebuah ruang. Dalam bukunya *Architectural Acoustics: Principles and Design*, Mehta menjabarkan pengaruh volume ruang terhadap nilai RT dalam grafik (Gambar 9). Survei pada ruang konser dengan bunyi yang diperkuat (*amplified*) dan diperuntukkan bagi jenis musik populer, jazz, pop dan pop rock disimpulkan bahwa pengukuran nilai RT_{60} pada frekuensi

tengah adalah representasi terbaik dari pendapat responden terhadap kualitas akustik ruang (Ellison, Schwenke, 2010).



Gambar 8: Waktu dengung yang disarankan sesuai dengan fungsi ruang (sumber: Thorburn, 2008)



Gambar 9: Waktu dengung optimum untuk berbagai fungsi akustika berdasarkan volume ruang (sumber: Mehta, 1999)

2. Kekuatan bunyi (Sound Pressure Level/SPL)

Pada mulanya SPL (dB) atau kepadatan energi yang dihasilkan oleh sumber bunyi tidak begitu diperhitungkan sebagai salah satu kriteria akustik ruang. Namun sejak kejelasan bunyi dan lafal digunakan juga sebagai parameter akustika maka SPL juga menjadi penting (Kuttruff, 2009). SPL ditentukan oleh kekuatan sumber bunyi dan tingkat penyerapan bunyi ruang (atau waktu dengung) (Kuttruff, 2009).

3. Initial Time Delay Gap (ITDG)

ITDG adalah nilai yang didapat dari pengurangan waktu bunyi pantul dan bunyi langsung. ITDG berfungsi memberikan kesan *surrounded* atau diselubungi oleh musik. Pengukuran dilakukan pada titik pendengar, dan nilai antar masing-masing titik dapat sangat bervariasi tergantung pada posisi sumber bunyi, jarak pendengar dan desain elemen pemantul bunyi. Nilai ITDG yang kecil memberikan keintiman atau kesan *surrounded* yang lebih baik.

4. Kejernihan bunyi (Clarity/ C50 – C80)

Clarity adalah rasio perbandingan antara bunyi yang datang terlebih dahulu dan yang datang kemudian dan diukur dengan satuan dB. C50 lebih digunakan pada pengukuran kualitas pidato, sedangkan C80 digunakan dalam penilaian kualitas ruang untuk fungsi musikal (Kuttruff, 2009). Kejelasan bunyi memiliki kaitan dengan nilai RT. Waktu dengung yang pendek memberikan kejelasan yang baik, waktu dengung yang panjang menghasilkan masking atau

bunyi yang kabur/tidak jelas (Barron, 2010). Nilai C80 dapat dihitung dengan persamaan:

$$C80 = 10 \log \frac{E_{0-80 \text{ ms}}}{E_{80-\infty \text{ ms}}}$$

Nilai batas untuk clarity adalah -5 dB untuk C50 (speech). Sedangkan untuk C80 (musik) skala interpretasi dijabarkan sebagai berikut (Renkus-Heinz, 2009):

- a) 0 +/- 2 dB, ideal untuk orgel dan alat musik tiup yang dimainkan dengan kecepatan rendah.
- b) 2 +/- 2 dB, ideal untuk alat musik tiup dan dimainkan dengan kecepatan rata-rata. Pada umumnya digunakan untuk pengukuran ruang dengan fungsi bagi jenis musik klasik atau simponi instrumental.
- c) 4 +/- 2 dB, ideal untuk alat musik yang dipetik. Digunakan sebagai pedoman pada pengukuran jenis musik kontemporer dan ringan.
- d) 6 +/- 2 dB, ideal untuk alat musik perkusi atau dipukul dan jenis musik Rock and Roll.

Untuk performa musik yang baik nilai C80 dianjurkan tidak melebihi +8 dB di lokasi manapun.

Selain itu nilai C80 pada ruang dengan jumlah penonton yang banyak dapat ditinjau dengan membagi ruang menjadi dua bagian; deretan depan dan

deretan belakang. Rentang nilai kejelasan bunyi berdasarkan pembagian area pendengar dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2: Nilai C80 yang disarankan berdasarkan pembagian area penonton (Makrinenko, 1993)

QUALITY STEPS	C80 Values, dB	
	Front rows	Back rows
Good	From +3 to +8	From 0 to +5
Acceptable	> +8 and -2 to +3	From +5 to +9
Unacceptable	< -2	> +9, < -5

5. Kejelasan lafal (*Definition/ D50 – D80*)

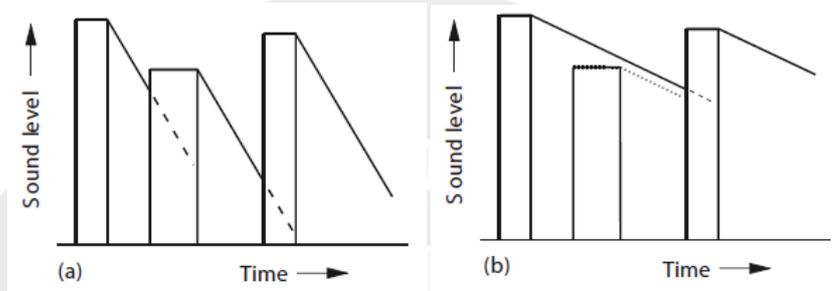
Definition adalah rasio perbandingan antara bunyi yang terlebih dahulu dengan total energy bunyi dan diukur dengan prosentase dan digunakan sebagai parameter kejelasan percakapan atau pidato (Kuttruff, 2009). Sama dengan parameter C50 dan C80, kejelasan lafal juga berbanding terbalik dengan nilai RT ruang. Nilai D50 dapat dihitung dengan persamaan:

$$D50 = 10 \log \frac{E_{0-50 \text{ msec}}}{E_{0-\infty \text{ msec}}}$$

6. Speech Transmission Index (STI) dan Rapid STI (RaSTI)

STI adalah nilai yang digunakan untuk mengindikasikan efek dari sistem transmisi bunyi terhadap kejelasan bunyi percakapan. Untuk memberikan jaminan kepada kejelasan bunyi manusia maka nilai STI minimal adalah 0,5. Pada Gambar 10 dapat dilihat perbandingan nilai STI dengan indikator kualitas akustik ruang pidato. STI dan RaSTI memiliki keterkaitan nilai centre time (T_s) yaitu waktu dari pusat gravitasi impulse response. Nilai T_s sendiri

berkaitan dengan clarity. Semakin tinggi nilai Ts maka semakin buruk kualitas kejelasan bunyi.



Gambar 10: Lama waktu pengurangan kekuatan bunyi pada laval pertama berpengaruh pada kejelasan pada laval kedua. (sumber: Barron, 2010)

Quality score	RASTI
Bad	< 0.32
Poor	0.32–0.45
Fair	0.45–0.60
Good	0.60–0.75
Excellent	> 0.75

Gambar 11: Penggolongan kualitas akustik ruang pidato berdasarkan nilai STI atau RaSTI (sumber: Kuttruff, 2009)

7. Early Decay Time (EDT)

EDT adalah waktu dengung yang diukur pada pengurangan bunyi pertama sebesar 10dB, diukur dengan satuan *millisecond* (ms) dan merupakan skala pengukuran waktu dengung ruang yang lebih detail. EDT sekarang lebih digunakan sebagai fundamental untuk mengukur kualitas ruang akustik untuk musik (Barron, 2010). EDT sangat dipengaruhi oleh refleksi awal (tergantung dari sumber bunyi dan posisi pengukuran) dan sangat sensitif terhadap geometri ruang (Kuttruff, 2009). Pada ruang yang sangat diffuse dimana nilai

pengurangan energi bunyi sangat linear pada pusat gravitasi ruang maka nilai RT dan EDT akan sangat identik (Barron, 2010). Pada audien dengan kondisi pendengaran normal, refleksi awal yang terintegrasi dengan suara langsung dapat meningkatkan kejelasan penangkapan bunyi (Roman, Woodruff, 2011).

8. *Sound Strength* (G)

Sound Strength adalah parameter yang mengukur tingkat dimana pendengar mengalami atau merasakan bunyi dan diukur dengan satuan dB. Pada pengukuran kejelasan bunyi, parameter RT₆₀ bukan satu-satunya patokan yang dapat mengindikasikan kualitas bunyi. Parameter G menunjukkan seberapa besar level (*gain*) bunyi yang akan ditambahkan pada nilai SPL dan kemudian dapat mengindikasikan muncul tidaknya resiko *noise* yang dapat mempengaruhi kejelasan bunyi (Luykx, Vercammen, 2014). Pengukuran nilai G dirasa penting pada ruang *sport hall* dimana banyak ketidakpuasan muncul akibat tingginya tingkat kebisingan yang muncul dari aktivitas itu sendiri dan tingginya level suara (Ruiter, 2010). Untuk ruang dengan fungsi yang belum memiliki standar nilai G, nilai batas maksimum dapat dihitung dengan persamaan berikut (Barron, 2010):

$$G(r) = 31 + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} + 4 \frac{(1 - \alpha_{source})^{\frac{rS}{4V}}}{S \alpha_{room}}$$

- $G(r)$: Batas atas nilai G pada radius (r) dari sumber bunyi
- Q : Jumlah sumber suara
- r : radius pengukuran dari sumber suara
- α : Rata-rata koefisien serap
- V : Volume ruang
- S : Luas permukaan bidang ruang dalam

9. *Lateral Fraction* (LF)

Lateral Fraction adalah rasio energi bunyi yang datang tidak dari arah sumber bunyi terhadap energi bunyi yang datang dari segala arah termasuk dari sumber bunyi. LF berfungsi dalam memberikan kesan bunyi yang meruang pada pendengar dan dipengaruhi oleh pengaturan pemantulan bunyi dari sumber bunyi langsung. Nilai LF yang baik akan diperoleh jika bunyi yang didengar oleh audien memiliki kekuatan yang setara antara telinga kiri dan kanan sehingga membentuk kesan stereo atau bahkan surround. LF berkaitan erat dengan ITDG dan potensi echo ruang. LF dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{LEF} = \frac{\text{Energy arriving laterally within 80msec of direct sound}}{\text{Energy arriving totally within 80msec of direct sound}}$$

Lateral Fraction memperkuat bunyi harmonik musikal. Meningkatnya nilai harmonik bunyi musikal juga membantu dalam pendengar dalam mengidentifikasi instrumen musik yang dimainkan dan jika keterlingkupan bunyi yang diterima akibat *lateral fraction* tidak terganggu, bunyi frekuensi bawah yang diterima akan lebih terasa (Lokki, 2011). Pada ruang pentas barisan pendengar mempengaruhi nilai frekuensi bawah pada bunyi langsung. Untuk memperoleh bunyi frekuensi bawah yang baik dan kuat, bunyi langsung membutuhkan bantuan pantulan awal (Zahorik, 2005), bantuan ini dapat diperoleh dengan mendapatkan nilai LF yang cukup.

10. Brilliance (Br)

Brilliance mendefinisikan kualitas bunyi yang dapat dirasakan dan jernih. *Brilliance* dapat dipenuhi dengan menyediakan energi bunyi yang cukup pada frekuensi tinggi. Beberapa sumber menyebutkan nilai $EDT_{2,000\text{Hz}}/EDT_{\text{Mid}}$ setidaknya bernilai 0.9, dan $EDT_{4,000\text{Hz}}/EDT_{\text{Mid}}$ setidaknya sebesar 0.8. Parameter ini dapat diukur dengan persamaan berikut:

$$\frac{EDT_{2,000}}{EDT_{\text{Mid}}} = \frac{EDT_{2,000}}{EDT_{500} + EDT_{1,000}}$$

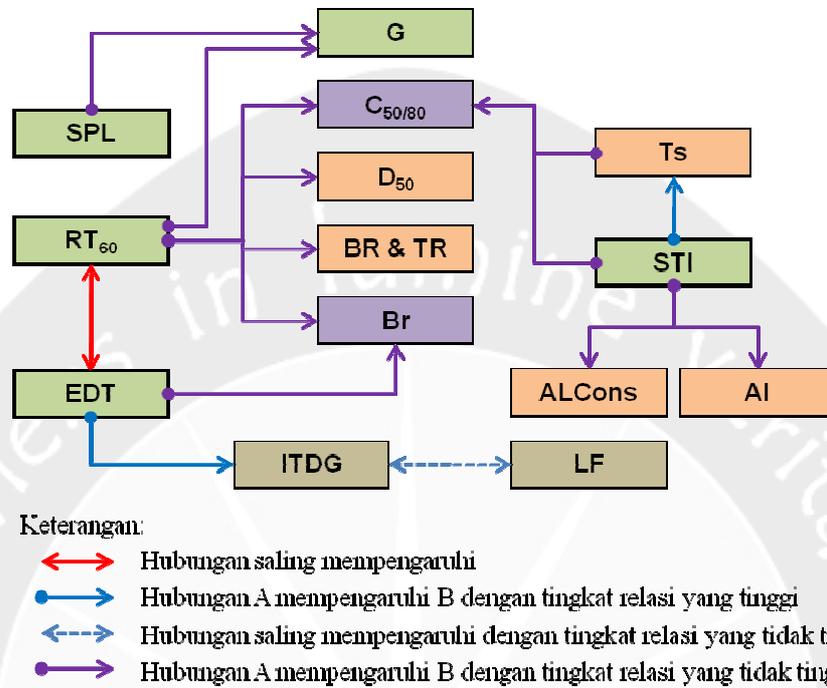
11. Bass Ratio & Treble Ratio (BR & TR)

Rasio bunyi bass digunakan untuk mengevaluasi “kehangatan” bunyi ruang. Jika bidang bunyi terlalu hangat ruang akan terkesan “gelap”. Rasio bunyi trible berbasis pada EDT digunakan untuk mengukur keseimbangan warna nada khususnya kejernihan bunyi. Rasio bunyi bass dan trible dapat dihitung dengan persamaan:

$$BR(RT) = \frac{RT(125\text{Hz}) + RT(250\text{Hz})}{RT(500\text{Hz}) + RT(1000\text{Hz})} \quad TR(RT) = \frac{RT(2000\text{Hz}) + RT(4000\text{Hz})}{RT(500\text{Hz}) + RT(1000\text{Hz})}$$

Keterkaitan antara parameter pengukuran dengan parameter subjektif yang dapat dirasakan pendengar dapat dilihat pada Tabel 3. Sedangkan keterkaitan dan tingkatan pengaruh antar parameter ukur dapat dilihat pada Bagan 1.

Bagan 1: Keterkaitan dan pengaruh antar paramater ukur objektif (Penulis, 2014)



Tabel 3. Ringkasan hubungan antara parameter ukur dengan parameter subjektif (diringkas dari Yilmaz, 2005)

Parameter Ukur (Objektif)	Parameter Subjektif
Initial Time Delay Gap (ITDG) 12msec < ITDG < 25msec	Keintiman Bunyi
Reverberation Time (RT ₆₀)	Gema ruang, Gaung, Kepenuhan Nada
Early Decay Time (EDT) Lebih kecil atau sama dengan RT ₆₀	Gema ruang, Gaung
Clarity (C80) +3 to +8 for front rows 0 to +5 for back rows	Kejelasan Bunyi Subjektif
Definition (D50) D50 > 65%	Kejelasan penggal kata, vocal, konsonan
Lateral Fraction (LF80) 0.1 < LF80 < 0.35	Perasaan meruang, stereo
Sound Transmission Index (STI) 0.6 < STI < 1.0	Kejelasan penggal kata, vocal, konsonan

C. Material Akustik Ruang

Salah satu tugas pertama dari konsultan dalam kaitannya dengan desain akustika ruang adalah untuk menerjemahkan ide-ide mengenai fungsi ruang ke dalam bahasa parameter medan bunyi dan menetapkan nilai-nilai yang menurutnya terbaik untuk memenuhi persyaratan akustika ruang (Kuttruff, 2009). Langkah berikutnya adalah penentuan bentuk, pemilihan material, penataan sumber bunyi dan target pendengar. Untuk kasus objek studi tahapan penentuan fungsi dan bentuk ruang telah dilewati.

1. Penyerap Bunyi (*Absorb*)

Material absorb adalah material yang mampu merubah energi bunyi menjadi bentuk energi lainnya berupa panas atau energi mekanik. Kemampuan material tersebut diklasifikasikan dengan nilai koefisien serap bahan. Nilai 1,00 (satu) mengindikasikan seluruh energi bunyi yang mengenai bidang bahan akan diserap sedangkan nilai 0,00 (nol) adalah kebalikannya. Dikarenakan ada perbedaan nilai koefisien serap, telinga manusia juga mampu mendeteksi perbedaan tersebut dengan cara yang subjektif (Tabel 4).

Tabel 4: Evaluasi subjektif perbedaan koefisien serap oleh pendengaran manusia.(Egan 1988)

Perbedaan Koefisien Serap	Efek pada Pendengaran
< 0,10	Kecil (terkadang tidak terasa)
0,10 – 0,40	Terasa
> 0,40	Sangat terasa

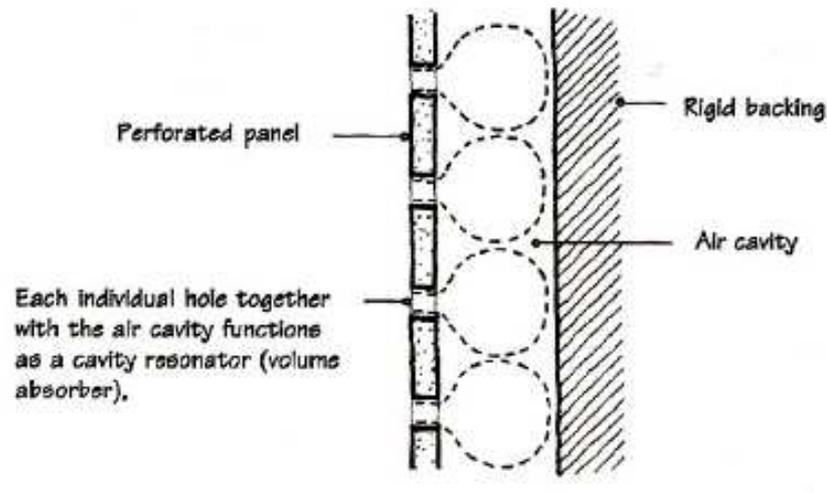
Ada tiga mekanisme yang mungkin diterapkan oleh material absorb: penyerapan berpori, penyerapan panel dan resonansi Helmholtz (Barron,

2010). Penyerapan berpori dapat berupa kain atau bahan seperti rockwool dan glasswool cenderung menyerap bunyi dengan frekuensi tinggi. Panel tipis akan menyerap sebagian energi dalam frekuensi rendah; energi yang diserap akan dirubah menjadi energi mekanis.

Resonator Helmholtz lebih akrab disebut botol anggur memiliki tiga lapisan bahan (Gambar 13) yaitu pada sisi depan berupa panel berlubang kemudian ruang udara yang juga terkadang digantikan dengan material berpori, dan sisi belakang yang solid dan keras. Ketebalan panel dan ukuran lubang berpengaruh pada energi frekuensi spesifik yang akan diserap, semakin banyak jumlah lubang per-meter persegi maka frekuensi bunyi yang akan diserap semakin tinggi. Sedangkan frekuensi bunyi lainnya akan dipantulkan kembali dalam bentuk diffuse. Penambahan material berpori pada rongga udara akan meningkatkan koefisien serap bahan. Kelemahan dari material ini adalah nilai koefisien serap bahan sangat tergantung oleh sudut datangnya energi bunyi.

	MATERIAL	Koefisien Serapan Bunyi						NRC
		125	250	500	1000	2000	4000	
	DINDING							
	Pemantul Bunyi							
1	Batu bata, tak diglasir	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,05
2	Batu bata, tak diglasir, dicat	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,00
3	Beton, kasar	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,05
4	Blok beton, dicat	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,05
5	Kaca, berat, (lebar)	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,05
6	Kaca, jendela biasa	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,15
7	Papan gipsum, tebal ½" (dipaku pada rangka 2/4, setiap jarak 16" as)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,05
8	Papan gipsum, 1 lapis, tebal 5/8" (disekrup ke rangka 1/3, setiap jarak 16", rongga diisi bahan isolator berserat)	0,55	0,14	0,08	0,04	0,12	0,11	0,10

Gambar 12: Koefisien serap beberapa material bangunan (Satwiko, 2009)

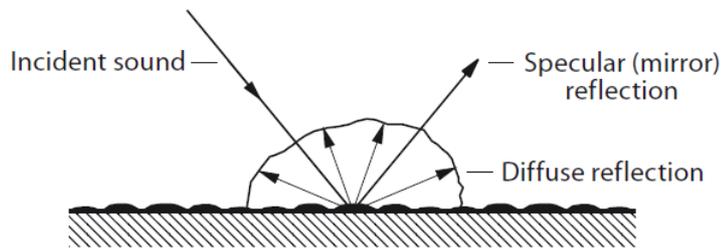


Gambar 13: Kontruksi umum penyerap bunyi berongga atau Helmholtz Resonator. (Everest, 2000)

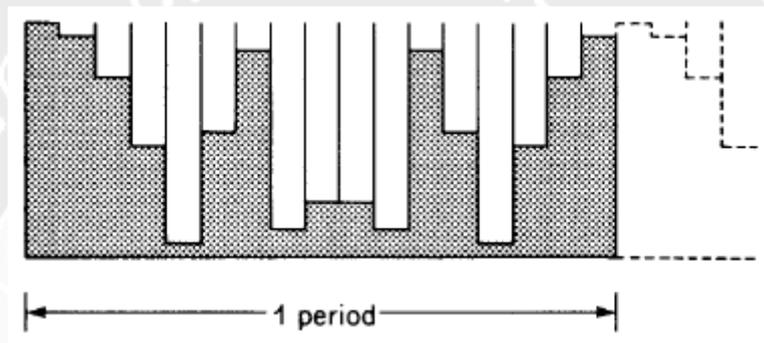
2. Penyebar Bunyi (Diffuse)

Material diffuse adalah material yang berfungsi memecah energi bunyi (diffuse/scatter). Permukaan bertekstur akan menghasilkan beberapa hamburan bunyi, tetapi tingkat teksture dari permukaan material harus tinggi untuk hasil hamburan yang efisien. Prinsip umum adalah bahwa semakin dalam perlakuan terhadap hamburan bunyi, semakin rendah frekuensi yang akan terpantul (Barron, 1993).

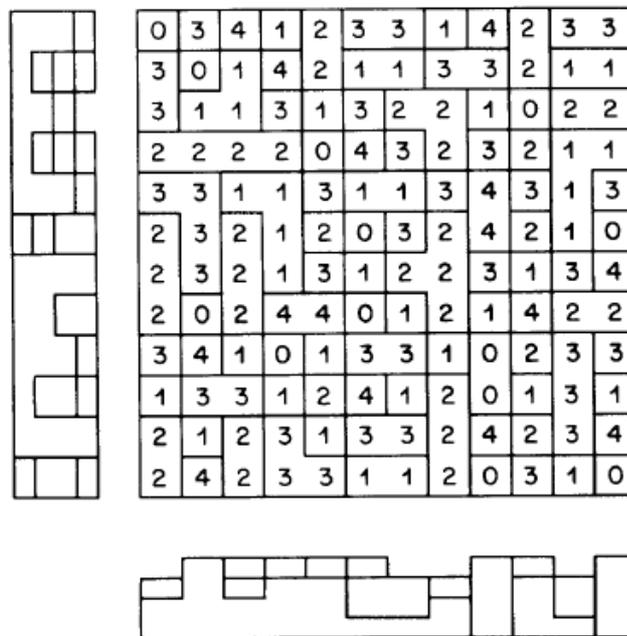
Bunyi yang diffuse dalam ruang selain dapat dihasilkan dengan menggunakan material bangunan, juga dengan desain pelingkup ruang dalam yang irregular atau penempatan kombinasi material penyerap, diffuse, dan reflektif secara acak. Pada ruang-ruang pentas lama masih menggunakan ornamen, relief atau patung sebagai penambah estetika ruang yang juga berfungsi sebagai material diffuse.



Gambar 14: Perilaku pantulan pada material diffuser (Barron, 2010)



Gambar 15: Pola quadratic residue diffuser (Walker, 1990)

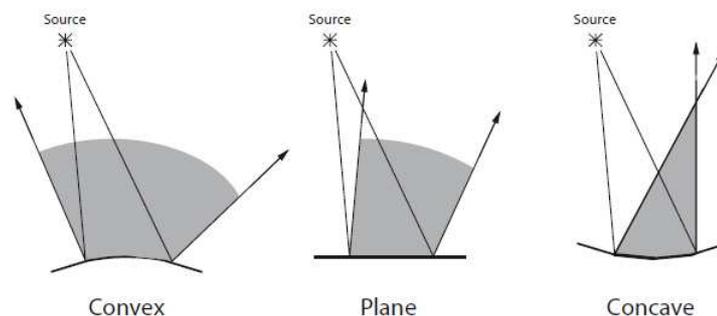


Gambar 16: Pola quadratic residue diffuser yang telah dikembangkan (Walker, 1990)

Selain material yang memiliki permukaan kasar, juga terdapat model diffuser yang dikenal dengan nama quadratic residue diffuser. Terdiri dari batang-batang lurus yang disusun berjajar dengan kedalaman berbeda (Gambar 15). Lebar batang, susunan, dan kedalaman masing-masing batang dalam satuan modul dapat berpengaruh pada rentang frekuensi tertentu. Semakin lebar dan dalam frekuensi bunyi yang akan di-diffuse-kan semakin rendah. Model diffuser ini juga dikembangkan menjadi bentuk grid dengan pola tertentu (Gambar 16).

3. Pemantul Bunyi (Reflektor)

Bahan pemantul bunyi memantulkan bunyi dengan sudut pantul sama besar dengan sudut datang bunyi pada garis tegak lurus bidang. Refleksi dari permukaan terbatas tergantung pada hubungan antara ukuran reflektor dan panjang gelombang bunyi. Refleksi sempurna terjadi pada frekuensi tinggi, sedangkan bila frekuensi diturunkan, energi yang dipantulkan akan berkurang. Jarak dari reflektor dari sumber dan penerima juga berpengaruh signifikan terhadap bunyi yang diterima (Barron, 2010).



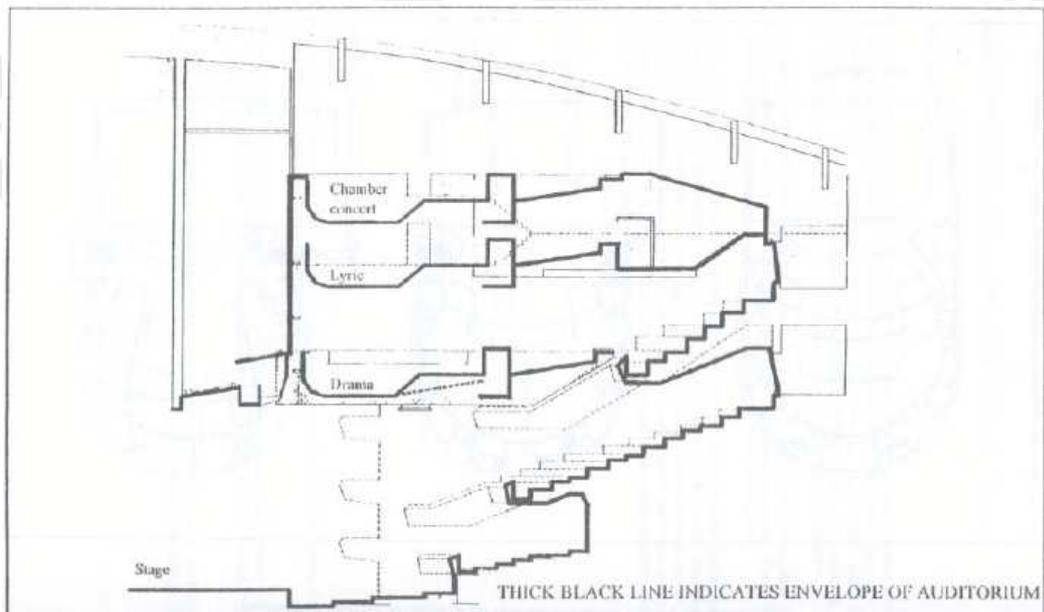
Gambar 17: Refleksi permukaan cembung, bidang datar dan permukaan cekung (Barron, 2010)

D. Variabel Fisik Akustik Ruang

Opsi untuk memberikan keragaman dalam kemampuan akustika sebuah ruang dapat dilakukan dengan cara berikut (Orlowski, 2002. Barron, 2010) :

1. Volume ruang yang dapat berubah-ubah.

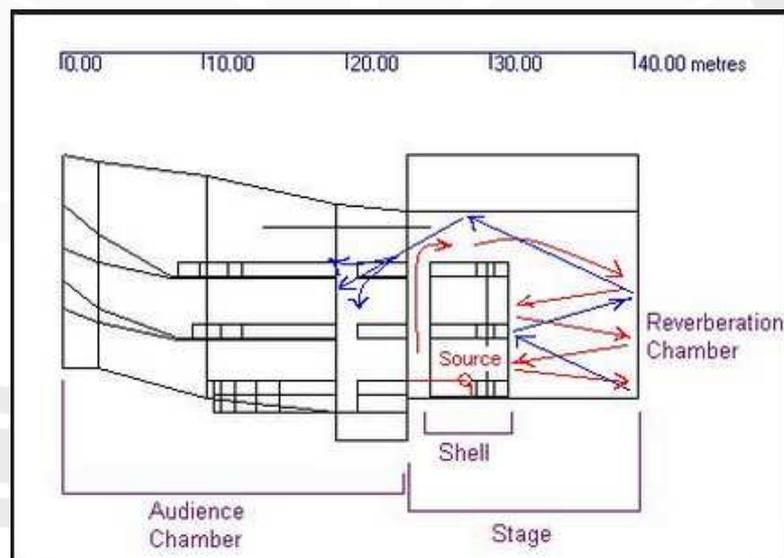
Perubahan volume ruang pada umumnya dengan mengubah ketinggian plafon atau lantai dengan sistem mekanis sehingga menambah volume ruang. Penambahan volume dengan material serap yang cukup dapat berpengaruh pada perubahan waktu dengung ruang (Barron, 2010). Teknik ini tidak hanya dapat berpengaruh pada RT tapi juga EDT. Pada beberapa kasus variabel volume dapat menaikkan atau menurunkan nilai RT. Sesuai dengan persamaan Sabine, peningkatan volume ruang yang tidak diikuti dengan penambahan jumlah material serap akan menaikkan nilai RT dan sebaliknya.



Gambar 18: Perubahan volume ruang karena plafon yang dapat disesuaikan, Milton Keynes Theatre (Orlowski, 2002)

2. Ruang dengung.

Ruang dengung (*reverberation chamber*) juga berpengaruh pada bertambahnya volume ruang. Namun berbeda dengan opsi pertama di atas yang menyebabkan perubahan kualitas akustik ruang karena perubahan volume ruang sesungguhnya. Pada teknik kedua ini perubahan kualitas akustik ruang terjadi karena adanya ruang komplementer perubah kualitas bunyi yang memantul kembali ke dalam ruang utama kemudian berbaur dengan bunyi asli ruang sesungguhnya. Audien akan merasa bahwa ruang yang ditempati lebih besar dari apa yang dapat diamati secara visual.

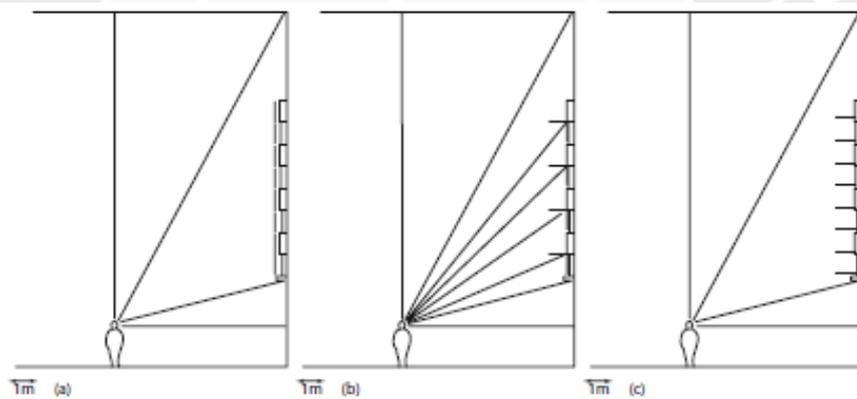


Gambar 19: Konsep ruang dengung, Gallagher-Bluedorn Performing Arts Center (www.e-sagephysics.com, diakses pada 02-10-2014)

3. Material penyerap bunyi yang dapat disesuaikan atau di bongkar pasang.

Penggunaan variasi material serap adalah cara yang paling umum dilakukan karena lebih mudah dalam aplikasinya di lapangan. Namun agar dapat berpengaruh pada RT ruang penambahan atau pengurangan material

penyerap harus dalam jumlah yang cukup banyak. Masalah utama pada variabel absorpsi adalah penempatannya (khususnya pada ruang tanpa penguat bunyi elektronik) agar hanya berpengaruh pada RT ruang tetapi tidak mengganggu nilai SPL dan EDT ruang. Solusi yang efektif untuk mendapatkan perubahan kualitas akustika ruang adalah dengan mengombinasikan penambahan variabel serap dengan variabel volume (Orlowski, 2002)

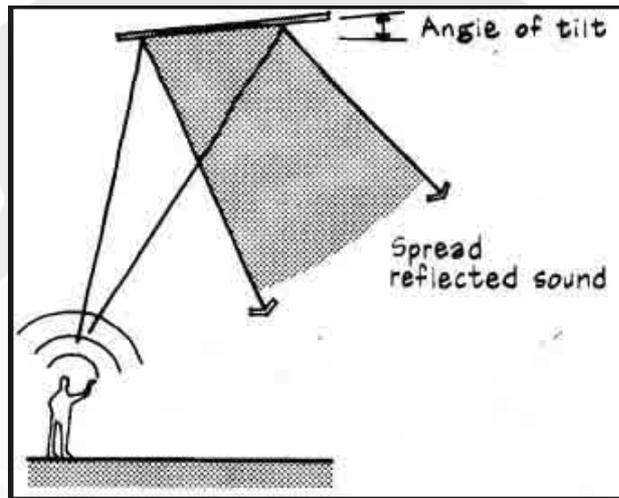


Gambar 20: Variasi material penyerap bunyi, Hong Kong Academy for Performing Arts (Barron, 2010)

4. Reflektor bunyi yang dapat disesuaikan.

Reflektor digunakan untuk memperjauh sebaran bunyi dari sumber kepada pendengar dan membantu memperkuat bunyi langsung yang datang (*early reflection*). Penggunaan teknik ini pada umumnya diterapkan pada plafond atau bidang atas ruang. Namun tidak menutup kemungkinan untuk diaplikasikan pada elemen vertikal seperti dinding. Penggunaan variabel reflektor umumnya digunakan untuk ruang tanpa penguat bunyi elektronik, namun dalam penerapannya tidak selalu berhasil dengan baik. Everest

menyatakan bahwa untuk dapat memantulkan energi bunyi dengan sempurna, maka besaran elemen pemantul memiliki panjang dan lebar sebesar lima kali panjang gelombang frekuensi bunyi yang diinginkan.



Gambar 21: Penempatan material pemantul bunyi (www.measurement-testing.com, diakses pada 02-10-2014)

5. Material penyebar (*scattering*) bunyi yang dapat disesuaikan.

Teknik ini cukup jarang digunakan karena memiliki efek yang kecil jika dibandingkan dengan teknik-teknik sebelumnya (Barron, 2010). Selain itu penggunaan teknik ini membutuhkan luas bidang yang cukup besar. Meskipun penambahan material diffuse memberikan dampak yang sedikit jika dibandingkan dengan material penyerap atau penataan orientasi bidang-bidang ruang, teknik ini masih memiliki kemungkinan besar untuk diaplikasikan, mengingat pengaruhnya terhadap nilai RT dan EDT.

6. Pengaturan jumlah audience sesuai dengan kegiatan yang berjalan

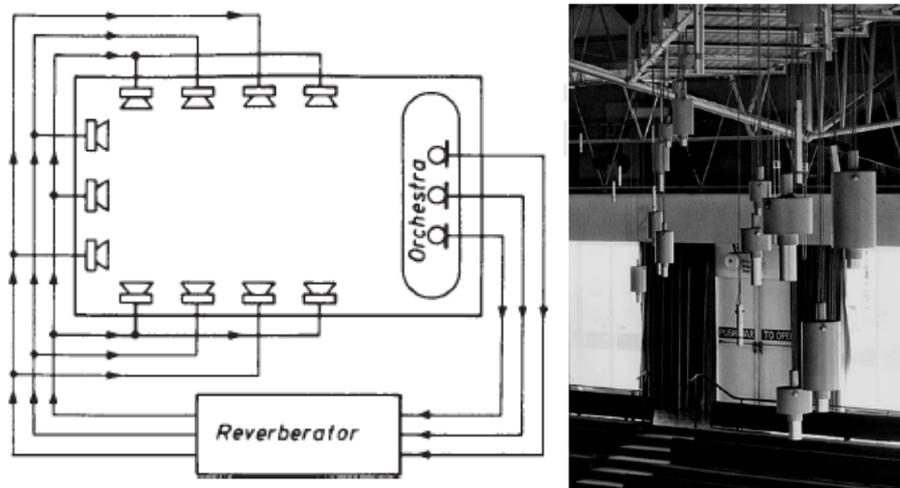
Pada kondisi normal pengguna ruang dapat meningkatkan atau menurunkan kualitas kejelasan bunyi (Bradley, 1996). Pengaruh pengguna ruang cenderung berdampak pada bunyi frekuensi tinggi (Satwiko, 2002), dikarenakan pakaian manusia yang cenderung berpori. Pada kondisi ruang dengan nilai waktu dengung (RT) tinggi pada frekuensi nada tinggi, mengatur jumlah pengguna ruang yang diperbolehkan menggunakan ruang pada kegiatan dengan kategori akustikal tertentu dapat menurunkan nilai RT sesuai dengan kebutuhan.

Tabel 5: Hasil nilai RT pada beberapa gereja karena pengaruh okupansi (Desarnaulds, 2002)

Church	Situation	Frequency (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Sacré-cœur	Occupied	-	3.93	4.66	4.13	3.54	2.75
	Unoccupied	3.26	5.88	6.83	6.47	5.91	4.19
	<i>difference</i>	-	1.95	2.17	2.33	2.37	1.43
Pasquart	Occupied	1.58	2.14	2.32	2.25	2.24	1.71
	Unoccupied	1.74	2.43	2.74	2.77	2.53	1.93
	<i>difference</i>	0.16	0.29	0.42	0.52	0.29	0.22
Fille-Dieu	Occupied	3.00	3.80	3.50	2.80	2.60	2.10
	Unoccupied	3.15	4.40	4.65	4.20	2.80	2.60
	<i>difference</i>	0.15	0.60	1.15	1.40	0.20	0.50
Cheseaux	Occupied	1.04	1.05	1.16	1.13	1.08	1.05
	Unoccupied	1.17	1.51	1.75	1.84	1.86	1.60
	<i>difference</i>	0.13	0.46	0.59	0.71	0.78	0.55
Romanel	Occupied	0.69	0.83	0.89	0.87	0.86	0.75
	Unoccupied	1.17	1.51	1.75	1.84	1.86	1.60
	<i>difference</i>	0.48	0.68	0.86	0.97	1.00	0.85
St. John	Occupied	2.86	2.45	2.43	2.18	1.92	1.70
	Unoccupied	3.09	3.32	3.31	3.22	2.73	2.42
	<i>difference</i>	0.23	0.87	0.88	1.04	0.81	0.72
Mean values	Occupied	2.1	2.3	2.5	2.2	2.0	1.7
	Unoccupied	2.2	3.1	3.4	3.3	2.9	2.3
	<i>difference</i>	0.2	0.8	1.0	1.2	0.9	0.7

7. Sistem akustika buatan.

Pada penggunaan sistem akustika buatan, kondisi ruang harus di tetapkan untuk fungsi pidato yang memiliki nilai RT rendah sehingga sistem bunyi buatan dapat disesuaikan dengan kebutuhan musikal. Sistem yang digunakan adalah *Assisted Resonance System*, yang menggunakan pemisah jalur kontrol terhadap mikrofon, penguat bunyi dan elemen akustik buatan lainnya. Sistem kedua yang dapat digunakan adalah *Multi Channel Reverberation* dimana setiap jalur mengontrol satu nilai frekuensi bunyi (Kuttruff, 2009. Barron, 2010). Ketiga adalah *Acoustic Control System* bekerja dengan cara merekam kualitas bunyi ruang melalui sejumlah mikrofon. Bunyi yang terekam akan diolah oleh mikroprosesor komputer untuk kemudian ditentukan respon desain keluaran bunyi yang sebaiknya akan keluar berikutnya, agar kualitas bunyi ruang dapat tercapai sesuai setting kebutuhan dan standar (Müller, 2012).



Gambar 22: Prinsip akustika buatan yang menggunakan eksternal reverberator, Central Hall, York University (kanan). (Kuttruff, 2009. Barron, 2010)

E. Tinjauan Software Simulasi Akustik

Konsep dasar dari lahirnya berbagai macam software simulasi *building performance* adalah untuk memberikan kemudahan dalam menerapkan konsep-konsep desain dalam proses desain secara lebih terukur. Tahap konseptual desain adalah proses iteratif yang melibatkan ide-ide yang perlu dicoba dan evaluasi. Hasil percobaan dan evaluasi akan menunjukkan apakah ide tersebut akan disingkirkan atau akan dikembangkan lebih lanjut. Dalam metode tradisional, percobaan terhadap sebuah ide dilakukan dengan menggunakan gambar, model (maket), dan beberapa perhitungan manual. Proses tersebut sangat memakan waktu dan mempengaruhi kecepatan perkembangan desain. Kemampuan untuk secepatnya membuang ide yang tidak tepat dapat menghemat waktu dan tenaga. Berikut adalah software simulasi akustika bangunan yang digunakan dalam penelitian ini.

1. Autodesk Ecotect 2010

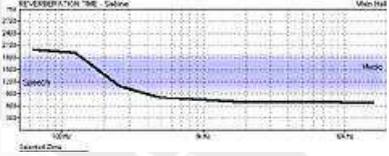
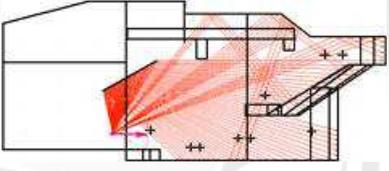
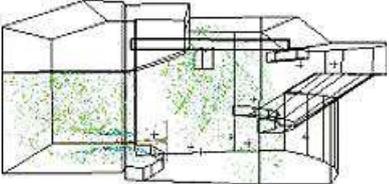
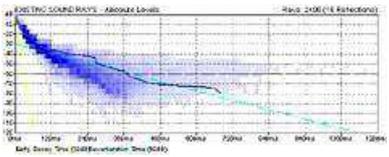
Program simulasi multi bidang ini pada awalnya dibuat dan ditampilkan oleh Dr. Andrew Marsh sebagai hasil dari program doktoralnya, dengan konsep bahwa performa bangunan harus diperhatikan oleh arsitek pada tahap awal proses desain, bukan pada tahap akhir dimana tidak lain hanya beberapa penambahan kosmetik yang mungkin dilakukan. Ecotect versi 2.5 pertama kali dipublikasikan dan dijual ke publik pada tahun 1996 dan berkembang hingga versi 5.6 pada tahun 2008. Pada tahun 2009 Ecotect diakuisisi oleh Autodesk yang kemudian merilis Autodesk Ecotect 2009 kemudian berkembang menjadi Autodesk Ecotect Analysis 2010.

Autodesk Ecotect menawarkan berbagai fungsi analisis akustika bangunan. Aspek terpenting dalam Ecotect adalah hubungan langsung antara perubahan geometry ruang dengan respon akustiknya. Kemampuan untuk melacak refleksi yang terjadi dan melihat bidang-bidang yang mendapat pengaruh refleksi adalah hal yang penting dalam tahap proses desain akustika ruang. Berikut adalah fungsi-fungsi analisis akustika yang dimiliki oleh program Ecotect.

Serupa dengan software modeling lainnya, beberapa penyederhanaan fenomena akustik juga diterapkan pada Ecotect. Asumsi yang digunakan dalam semua kalkulasi geometri akustik adalah sebagai berikut:

- i. Semua bidang ruang yang rumit disederhanakan menjadi sebuah bidang planar.
- ii. Gelombang suara dianggap sebagai gelombang energi yang berjalan lurus.
- iii. Energi suara memiliki perilaku sebagai fungsi energi, artinya energi suara yang ada mungkin akan diakumulasi.
- iv. Fenomena seperti pentahapan dan gangguan antar gelombang suara diabaikan.
- v. Koefisien serap permukaan bidang tidak dipengaruhi oleh sudut jatuh energi suara.

Tabel 6: Fungsi analisis akustika pada Autodesk Ecotect Analysis 2010

Fungsi	Keterangan	Ilustrasi
<p>Statistical Reverberation</p>	<p>Menggunakan volume ruang dan data material dalam menghitung nilai Waktu Dengung (RT). Nilai RT bukanlah satu-satunya nilai ukur yang menunjukkan kualitas akustika ruang, namun sering digunakan dalam berbagai proyek bahkan oleh ahli akustik.</p>	
<p>Linked Acoustic Rays</p>	<p>Adalah teknik visualisasi Ray-Tracing. Saat ditampilkan, setiap perubahan pada sumber bunyi dan geometri ruang akan merubah perilaku semburan dan pantulan partikel.</p>	
<p>Acoustic Rays & Particles</p>	<p>Digunakan untuk melihat perambatan partikel suara dalam ruang. Fungsi ini juga dapat memperlihatkan nilai Delay dan level kualitas suara (direct,useful,border,masking, echo).</p>	
<p>Acoustic Response</p>	<p>Analisis ini menggunakan hasil perhitungan perilaku partikel yang telah dilakukan sebelumnya atau dengan memancarkan partikel baru secara acak. Analisis ini akan menghasilkan nilai RT spasial ruang.</p>	

Metode perhitungan statistik pada dasarnya berguna saat tahap awal desain meskipun memiliki banyak keterbatasan dalam memprediksi kesalahan atau kekurangan akustika ruang. Ecotect meskipun telah menggunakan metode partikel dan ray juga memiliki kekurangan dalam pengukuran akustika ruang. Parameter-parameter pengukuran seperti STI, EDT, D_{50} , C_{80} , dan lain-lain tidak diperoleh. Meskipun begitu penggunaan software ini akan sangat membantu dalam melakukan analisa awal dan prediksi-prediksi sebelum melangkah ke tahapan analisa yang lebih detail dan memakan waktu simulasi lebih lama.

2. CATT Acoustic

CATT Acoustic adalah software yang memungkinkan investigasi terhadap karakteristik akustik ruang dilakukan dengan lebih detail. Software ini awalnya dikembangkan pada tahun 1989 dengan menggunakan metode *Image Source Model* (ISM) untuk mendeteksi refleksi awal dan metode *ray-tracing* untuk mengetahui nilai *late decay*. Pada tahun 1995 penerapan modul auralisasi (memproduksi bunyi yang dihasilkan dalam simulasi agar dapat didengar nyata) mulai dapat dilakukan pada komputer standar. Pada tahun 1998 CATT Acoustic versi 7 untuk windows 32-bit diluncurkan ke pasaran dengan memperkenalkan metode Randomised Tail-corrected Cone-tracing (RTC), metode yang lebih sederhana namun memiliki variasi yang lebih kuat hasil penyempurnaan selama lima tahun. Metode ini digunakan untuk memprediksi parameter akustika ruang dan auralisasi, dan sampai saat ini menjadi metode simulasi utama yang digunakan dalam CATT. Meskipun demikian metode

sebelumnya seperti standar ray-tracing dan ISM tetap disertakan, karena dalam beberapa kasus, pengamatan pertama tidak selalu dilakukan pada hasil simulasi dengan metode RTC. Pengamatan pada mapping hasil simulasi yang menggunakan ray-tracing masih penting untuk dilakukan.

CATT Acoustic v8, terdiri dari tujuh modul aplikasi yang terintegrasi untuk digunakan pada Windows 32-bit dan mengkombinasikan prediksi numerikal, sumber bunyi yang lebih dari satu, konvolusi (perubahan bentuk gelombang), auralisasi, pengolahan yang bertahap, directivity sumber bunyi dan properti bahan yang umumnya digunakan. Sebagai tambahan *viewer* 3D yang berbasis *OpenGL* juga disertakan untuk mempermudah presentasi hasil simulasi. Proses dalam CATT dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- i. Geometri model; menggunakan hirarki berdasarkan *file* dengan deskripsi. Penggunaan simbol konstanta, aritmatika dan matematika dapat digunakan untuk mendefinisikan koordinat titik dan bidang. Fasilitas seperti skala, duplikat, perulangan, *mirroring*, dan rotasi dapat mempermudah dalam proses modeling pada CATT. Alternatif yang lebih mudah digunakan adalah kemampuan untuk mengambil model CAD (DXF) dari software lainnya untuk dikonversi menjadi model dengan format CATT.
- ii. Properti bahan dan loudspeaker; dapat diperoleh dari koleksi CATT atau dari sumber lainnya dengan format yang mudah untuk diaplikasikan kedalam bahasa program CATT. Properti bahan berupa koefisien serap dan koefisien sebar yang didefinisikan dalam angka

pada rentang frekuensi 125Hz – 16kHz. Directivity sumber suara dapat dibuat dengan format 10^0 , 15^0 , atau *DDL directivity interface*. Pembuatan dapat dilakukan dengan fasilitas modul konversi Polar Pattern (disediakan oleh produsen loudspeaker) kedalam file format yang dapat dibaca oleh CATT. Hasil konversi ini dapat menunjukkan *Polar Pattern* pada CATT, *3D balloons*, kontur -3/-6/-9 dB, dan visualisasi *ray* bunyi yang keluar.

iii. Pengukuran akustik ruang; dapat dilakukan dengan meninjau hasil simulasi. Parameter pengukuran yang ditampilkan adalah *Early Decay Time* (EDT), T-15, T-30, *Eyring* dan *Sabine (interactive)* · SPL (juga dBA), *Strength* (G), *Speech Transmission Index* (STI/RASTI), *Definition* (D-50/C-50), *Clarity* (C-80), *Lateral Energy Fraction* (LF, LFC), *Center of Gravity* (Ts), *Inter Aural Cross-correlation Coefficient* (IACC, setelah *binaural postprocessing*), *Mean absorption factor* dan *mean free path*. Semua hasil ditampilkan dengan format yang mudah dibaca dan dipahami serta dilengkapi dengan visualisasi mapping tampak atas maupun 3D.

iv. Auralisasi; adalah kemampuan CATT untuk memproduksi bunyi hasil simulasi yang terjadi dalam ruang percobaan sebagai bahan evaluasi hasil secara kualitatif. Bunyi yang diproduksi adalah yang terdengar pada titik-titik sampling audien. Bunyi yang diproduksi juga dapat berupa suara manusia dan musik dengan model mono atau stereo. Selain bunyi tunggal pada masing-masing sampel audien, juga dapat

dihasilkan bunyi yang serial seakan-akan audien berjalan dari satu titik pengamatan ke titik lainnya (*walkthrough*).

F. Pernyataan Penelitian

Penggunaan variabel fisik akustik ruang dapat mengakomodasi kebutuhan kualitas akustika ruang Student Centre UAJY untuk kegiatan yang didominasi instrumen musik atau pidato.

