

Sinkronisasi Sensasi Pendengaran dan Visual di dalam Dunia Simulasi Komputer

Sentagi S. Utami¹, Mojtaba Navvab², Randy F. Fela³

Abstract— Current application of virtual environment synthesized by computer simulation still focuses on generating visual cues, while auditory cues has not yet been optimized to create individual movements within the virtual space. Auditory cueing is limited to the ability in detecting the presence of a sound source without further perception. Auralization of variety of spaces with the impact of a variety of architectural elements were synthesized. The auralization data were produced using current computer-simulation technique where both visual and acoustics properties of the room boundaries are considered. Noticeable differences in the auditory cognition of the virtual spaces are measured through the use of subjective evaluation. The acoustical quality are also evaluated utilizing several objective acoustic measures. Diffuser panels were able to increase ability of sound localization up to 12.5% out of the 40 respondents. These panels also increased the speech intelligibility quality, indicated both by the C_{50} which increased by 89% with 97.5% of respondents approved this condition. Analysis of the subjective and objective measures indicates to what extent the alteration of the simulation is required to create a noticeable auditory cues that enhance the auditory and visual sensation of the virtual space.

Intisari— Saat ini, aplikasi dunia maya yang interaktif baik untuk simulasi maupun untuk permainan (*gaming*) lebih berfokus pada penggunaan rangsangan visual. Sementara rangsangan pendengaran belum dioptimalisasi penggunaannya untuk memandu gerakan seseorang di dalam ruang virtual. Rangsangan *audial* masih dibatasi pada kemampuannya untuk mendeteksi adanya sumber bunyi namun tidak untuk memberikan persepsi pendengaran yang lebih berarti. Pada makalah ini, auralisasi dari beberapa ruang yang dipengaruhi oleh variasi elemen arsitektur ruang telah disintesis. Data auralisasi diperoleh melalui teknik pemodelan komputer yang telah ada di mana sifat-sifat visual dan akustik dari bidang batas ruang tetap diperhatikan. Perbedaan yang dikaji pada sensasi pendengaran di dalam ruang uji diukur menggunakan evaluasi subjektif. Panel *diffuser* mampu meningkatkan kemampuan lokalisasi sumber bunyi dari 12,5% dari total 40 responden. Panel ini juga mampu meningkatkan kualitas percakapan dengan nilai C_{50} yang meningkat sebesar 89%. Kondisi ini diidentifikasi juga oleh 97,5% responden. Analisis terhadap hasil evaluasi subjektif dan nilai parameter objektif ini mengindikasikan sejauh mana modifikasi dalam simulasi perlu dilakukan untuk menciptakan rangsangan pendengaran yang

berbeda, yang mampu menguatkan tidak hanya sensasi visual namun juga sensasi pendengaran di dalam ruang virtual.

Kata Kunci— rangsangan visual, rangsangan *audial*, sensasi pendengaran, auralisasi, simulasi komputer.

I. PENDAHULUAN

Lingkungan pendengaran merupakan sebuah hasil fenomena pantulan, serapan, dan transmisi dari perambatan energi bunyi yang disebabkan oleh unsur-unsur arsitektur ruang. Dalam dunia *game* dan simulasi komputer virtual, para pengguna (*user*) ingin mengalami tidak hanya sensasi visual namun juga sensasi pendengaran yang lebih nyata sehingga dapat membedakan kondisi ruangan, misalnya ketika pengguna berada di dalam sebuah terowongan tertutup dengan langit-langit berbentuk melengkung yang reflektif tentu akan berbeda sensasinya dengan saat berada di dalam ruangan besar yang sangat menggema (*reverbrant room*), meskipun keduanya memiliki sifat gema yang sangat besar. Namun demikian, seringkali pengalaman akustik yang lebih detail seperti dampak dari pemfokusan bunyi dan difusi bunyi belum dapat dikenali oleh pengguna.

Kompleksitas dari dunia virtual yang terdiri dari efek visual dan pendengaran sangat bervariasi mulai dari penampakan benda-benda virtual yang kompleks seperti sebuah kawasan huni, jalan, dengan berbagai sumber bunyi, sampai ruang sederhana yang dieksitasi oleh bunyi dengan frekuensi tunggal. Di dalam *game virtual* atau permainan komputer (*computer gaming*), stimulus pendengaran dan visual merupakan komponen utama dalam menyediakan interaksi antarmuka dengan manusia. Faktor-faktor yang mengatur integrasi dari stimulus-stimulus ini, terutama yang bertujuan untuk meningkatkan kognisi manusia, dapat ditemukan pada referensi [1]. Selain itu, juga terdapat efek fisiologis dan psikologis dari berbagai jenis bunyi yang umumnya digunakan di dalam *computer gaming* [2].

Simulasi yang menghasilkan respons impuls ruang dan auralisasi menggunakan perangkat lunak berbasis prinsip geometri akustik ruang (*geometrical room acoustics*) telah digunakan secara luas sebagai suatu teknik untuk menghasilkan lingkungan akustik virtual [3]. Teknik yang sering dikenal dengan auralisasi ini telah berkembang hingga mampu menyediakan data auralisasi secara *real-time* [4], [5], [6]. Beberapa studi telah meninjau pemilihan sistem dan teknologi berdasarkan kriteria desain fisik untuk berbagai aplikasi seperti pada alat bantu navigasi, ruang kontrol virtual, pembangkit dunia virtual multimodal terintegrasi, dan penelitian psikofisik [7], [8].

Tinjauan singkat terhadap beberapa referensi tersebut menyoroti pentingnya sinkronisasi informasi yang diperoleh

^{1,3} Teknik Fisika, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No.2, Bulaksumur, Yogyakarta 55292 INDONESIA (telp: 0274-580882; fax: 0274-580882; e-mail: sentagi@ugm.ac.id; randyrf@gmail.com)

² Taubman College, University of Michigan-Ann Arbor, 2000 Bonisteel Boulevard Ann Arbor, MI 48109-2069 USA (telp: 01-734-764-1300; e-mail: moji@umich.edu)

dari stimulus visual dengan stimulus pendengaran di dalam program antarmuka untuk permainan (*gaming interface program*) serta metode dan teknik yang tersedia untuk menciptakan interaksi manusia (*human interaction*) dan performa perilaku yang lebih baik. Saat ini, adegan-adegan visual di dunia maya dapat menjadi nyata mungkin dikarenakan kemampuan komputasi yang tinggi sehingga batasan-batasan dari sebuah program tergantung pada ide-ide perancang permainan atau simulasi.

Akan tetapi, perlu disadari bahwa efek visual yang hadir akibat adanya benda-benda virtual misalnya properti ruang, komponen abiotik (aliran air, angin, kondisi udara), bahkan kehadiran manusia, juga mempengaruhi efek pendengaran yang dapat diketahui melalui nilai-nilai parameter objektif akustiknya. Oleh karena itu, sejauh mana detail di dalam penyediaan efek visual juga perlu dipertimbangkan agar mampu menciptakan efek pendengaran yang paling relevan.

Makalah ini berfokus pada upaya untuk menciptakan lingkungan bunyi virtual yang bersifat nyata dengan memanfaatkan teknik auralisasi menggunakan detail dari pemodelan simulasi. Hal ini dapat dicapai dengan mengidentifikasi elemen-elemen ruang yang memiliki dampak akustik paling besar. Dalam makalah ini juga ditunjukkan sebuah metode terintegrasi dengan memanfaatkan pengukuran lapangan untuk melokalisasi dan memvisualisasikan pantulan-pantulan dari permukaan kemudian menggunakannya sebagai data awal untuk pembuatan model simulasi. Hasil pada makalah ini adalah *database render audial (auditory rendering database)* dari berbagai ukuran dan bentuk ruang yang memiliki kondisi akustik tertentu, yang kemudian diubah melalui modifikasi atribut fisik dari ruang model seperti peredam akustik, *diffuser* akustik, perabotan (*furniture*), dan benda-benda lainnya.

II. AURALISASI DENGAN SIMULASI KOMPUTER

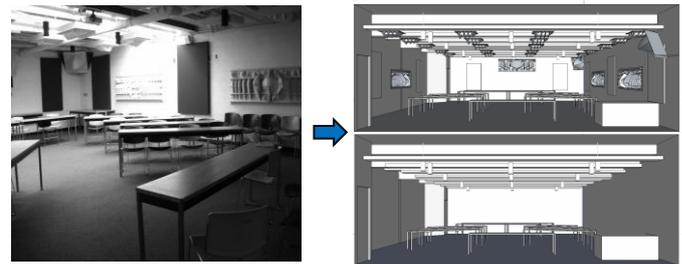
Auralisasi adalah teknik pengolahan sinyal berbasis data numeris (disimulasikan, diukur, disintesis) untuk menciptakan dokumen bunyi yang dapat didengarkan. Subjek akan mendengarkan hasil dokumen bunyi yang telah disintesis, yang dapat mewakili kondisi akustik sebenarnya dari ruangan yang diamati, tanpa harus berada di dalam ruangan tersebut [9].

Simulasi komputer berbasis pada pemodelan atribut fisik dari ruang yang diamati dan perilaku alami akustik ruang menggunakan algoritme matematika. Teknologi komputer telah berkembang pesat selama dekade terakhir ini untuk menyediakan kemampuan simulasi yang telah jauh melebihi apapun yang mungkin disimulasikan dari karakteristik akustik sebuah ruang, hingga menjadi *virtual acoustic reality*.

A. Pemodelan Komputer

Geometri ruang, sumber bunyi, dan penerima bunyi perlu didefinisikan sebagai objek matematika agar dapat diterapkan algoritme yang menghasilkan auralisasi. Karakteristik akustik dari permukaan ruang sangat tergantung pada koefisien serapan dan hamburan bunyi. Pada awalnya, model simulasi diambil dari model CAD yang mungkin masih memiliki

geometri yang kompleks seperti ditunjukkan oleh Gbr. 1. Oleh karena itu, perlu dilakukan penyederhanaan model agar memiliki resolusi yang relevan secara akustik. Telah ada beberapa penelitian yang mengkaji hal ini [9].



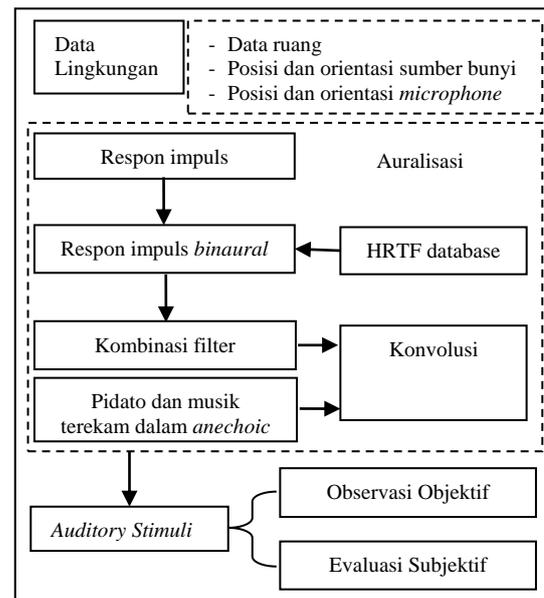
Ruang sebenarnya

Ruang hasil pemodelan

Gbr. 1 Interpretasi model CAD dari kondisi ruang sebenarnya.

B. Simulasi ruang Binaural

Karakteristik medan bunyi dapat dimodelkan dalam simulasi komputer. Isyarat medan bunyi dapat ditransformasikan menjadi rangsangan pendengaran pada telinga kiri dan kanan manusia menggunakan pemodelan yang disebut teknologi binaural [10]. Proses simulasi ruang binaural dapat dipahami sebagai gabungan dari dua langkah teknis yakni pemodelan medan bunyi dan auralisasi untuk menghasilkan kondisi akustik ruang sebenarnya, yang kemudian diproses menjadi *audible soundfile* untuk diperdengarkan kepada responden saat evaluasi subjektif. Detail dari proses ini ditunjukkan pada Gbr. 2.



Gbr. 2 Proses auralisasi binaural untuk menghasilkan stimulus *audial*.

III. DESKRIPSI RUANG AKUSTIK VIRTUAL

Model simulasi dari ruang yang diamati dalam makalah ini merupakan hasil dari perubahan-perubahan pada desain agar mampu menciptakan medan bunyi yang *diffuse* (menyebarkan). Seperti dijelaskan oleh Hodgson (Hodgson, 1994), bahwa medan bunyi dianggap menyebar jika memenuhi dua kondisi

berikut; (1) pantulan bunyi yang datang dari semua arah memiliki intensitas yang sama; dan (2) medan bunyi yang bersifat gema adalah sama di setiap posisi di dalam ruangan [11]. Dengan kondisi tersebut, telah menjadi kecenderungan saat ini untuk menggunakan peredam akustik (*absorber*) dan *diffuser* bersama-sama di dalam sebuah ruangan yang sama.

Beberapa ruang telah digunakan sebagai objek dari penelitian ini di mana sebagian besar merupakan ruang kelas. Terdapat ruang yang dalam kondisi sebenarnya telah diberi perlakuan akustik. Perbedaan tampilan visual antara ruangan yang diberi perlakuan akustik dengan yang tanpa perlakuan akustik sangat jelas terlihat yakni dengan ada dan tidak adanya beberapa elemen panel akustik. Selain itu, pembatas ruang akan memiliki properti akustik yang berbeda. Sifat yang paling berpengaruh yakni kemampuan serapan energi bunyi atau nilai koefisien absorpsi akustik (*absorption coefficient*) dan sifat penghamburan bunyinya (*scattering coefficient*).

IV. METODOLOGI

Pada bagian ini dijelaskan metode yang diusulkan dengan contoh aplikasi dalam ruang tertentu. Pertama, sifat geometri ruang terlebih dahulu diidentifikasi. Pada kasus pertama digunakan ruang kelas berbentuk persegi panjang berdimensi 6 x 10 x 3 meter seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 1. Ruang kelas ini selanjutnya dinamakan ruang kelas I dan kemudian dilakukan enam skenario modifikasi dengan menambahkan *diffuser* dan *absorber* di dalam ruangan. Di antara dua kondisi yang memiliki kondisi akustik paling ekstrem dievaluasi menggunakan evaluasi subjektif.

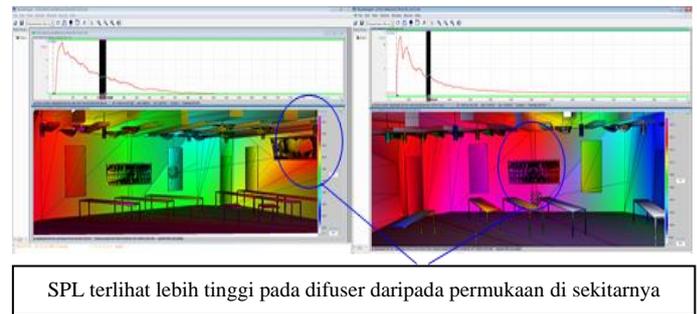
A. Pengukuran Lapangan

Panel *diffuser* dan *absorber* telah digunakan di dalam ruang kelas untuk kasus pertama. Menggunakan *multi microphone array* yang mampu mengidentifikasi pantulan-pantulan bunyi dari permukaan untuk selanjutnya divisualisasikan perambatan bunyinya, dimungkinkan untuk mengkaji kinerja dari elemen-elemen arsitektural yang ada di dalam ruangan tersebut. Hasil pengukuran yang diperoleh dapat dianalisis melalui perhitungan lebih lanjut dengan adanya respons impuls ruang baik dalam domain waktu maupun frekuensi. Selanjutnya, sebuah gambar akustik yang sesuai dengan refleksi permukaan di dalam ruang dapat divisualisasikan menggunakan perangkat lunak Noise-Image® sebagaimana terlihat di Gbr. 3. Perkembangan terbaru dari perangkat lunak tersebut telah ditekankan pada aplikasi akustik ruang dan bangunan (Acoustic Camera, 2009).

Pada proses pengukuran lapangan, ruangan diberi sinyal impuls dari ledakan balon. Selain itu juga direproduksi bunyi dari *loudspeaker* yang dipasang mengelilingi langit-langit. Bunyi yang dimainkan berupa cuplikan gubahan Mozart oleh empat instrumen musik gesek yaitu biola dan cello (*string quartet*) [12].

Gbr. 3 menunjukkan sinyal respons impuls yang dianalisis pada awal bagian komponen refleksi akhir. Untuk potongan tertentu dari sinyal tersebut, terlihat panel *diffuser* (elemen yang dilingkari) lebih reflektif dari permukaan di sekitarnya yang ditunjukkan oleh warna yang lebih merah, yakni warna

untuk Tingkat Tekanan Bunyi (*Sound Pressure Level/SPL*) yang lebih tinggi. Panel *absorber* tampaknya berhasil menyerap bunyi meskipun pada potongan sinyal respons impuls ini tidak terlalu signifikan serapannya.

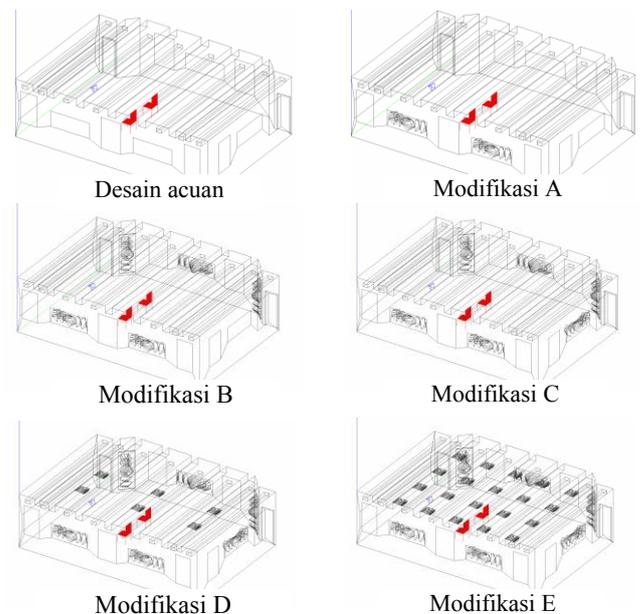


SPL terlihat lebih tinggi pada difuser daripada permukaan di sekitarnya

Gbr. 3 Visualisasi refleksi bunyi yang diperoleh dari pengukuran lapangan menggunakan Acoustic Camera ©.

B. Simulasi Komputer

Hasil yang diperoleh dari pengukuran lapangan menunjukkan elemen-elemen ruang penting yang harus diperhitungkan dalam simulasi komputer. Enam perubahan desain ruang kelas I ditunjukkan pada Gbr. 4.



Gbr. 4 Simulasi komputer dari ruang kelas I menggunakan EASEaura©.

Modifikasi yang dilakukan dalam ruang simulasi adalah dengan menambahkan panel *diffuser* dan mengamati perubahan tingkat difusivitas medan bunyi pada dua posisi pengukuran. Tingkat difusivitas diukur dengan nilai koherensi dari respons impuls pada dua posisi berbeda di dalam ruang simulasi dengan pendekatan matematis yang ditunjukkan dengan (1), (2), dan (3).

Tingkat difusivitas akustik ini diobservasi dalam domain frekuensi menggunakan nilai koherensi untuk rentang frekuensi oktaf dengan frekuensi tengah dari 63 Hz hingga 8 kHz. Penggunaan fungsi korelasi pada domain frekuensi ini

dianggap menghasilkan prediksi tingkat penyebaran yang lebih baik [13]. Oleh karena itu, nilai $E_1(t)$ dan $E_2(t)$ pada (1), (2), dan (3) digantikan dengan mengubah ke domain frekuensi menggunakan *FFT* pada proses pengolahan sinyalnya, seperti pada (4).

$$Coh(t) = \frac{1}{T_D \sqrt{P_1 P_2}} \sum_{t=0}^{T_D} E_1(t) E_2(t) \quad (1)$$

$$P_1 \rightarrow P_{E,1} = \frac{1}{T_D} \sum_{t=0}^{T_D} E_1(t)^2 \quad (2)$$

$$P_2 \rightarrow P_{E,2} = \frac{1}{T_D} \sum_{t=0}^{T_D} E_2(t)^2 \quad (3)$$

$$F_1(f) = fft(E_1(t)); F_2(f) = fft(E_2(t)) \quad (4)$$

Parameter objektif lain yang umumnya digunakan dalam kajian akustik ruang juga dianalisis, yakni *T30* untuk waktu dengung, *EDT* untuk waktu peluruhan energi awal, *C50* untuk tingkat kejelasan wicara, *C80* untuk tingkat kejelasan bunyi musik, dan *Total SPL* yang menunjukkan tingkat peluruhan energi bunyi dari yang dihasilkan sumber hingga diukur di titik penerima. Analisis pada nilai-nilai parameter objektif ini kemudian dikaitkan dengan hasil evaluasi subjektif guna melihat apakah modifikasi ruang simulasi berupa penambahan panel *diffuser* telah menghasilkan perubahan yang berarti.

C. Evaluasi Subjektif

Desain eksperimental dalam evaluasi subjektif dikembangkan untuk mengevaluasi semua kombinasi dari variabel yang akan diteliti. Aspek penting dalam evaluasi subjektif adalah kemampuan untuk melacak semua perubahan arsitektur ruang dari skenario virtual di mana auralisasi dihasilkan, menjadi satu set besar data yang dapat diperdengarkan ke responden.

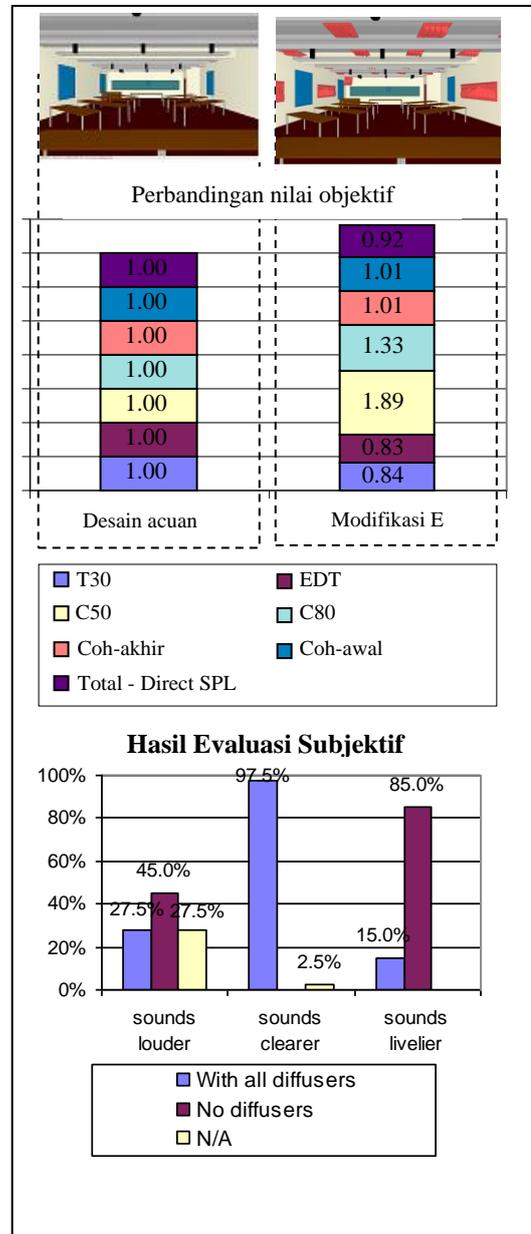
Tingkat difusivitas, ukuran ruangan, dan elemen-elemen arsitektural yang dihadirkan dalam jalur bunyi merupakan parameter yang dimainkan pada simulasi komputer. Auralisasi dari ruangan yang dikaji dilakukan menggunakan perangkat lunak akustik ruang. Respons impuls dengan model binaural dikerjakan dengan mengacu pada *HRTF (Head Related Transfer Function)* sebagaimana ditunjukkan pada Gbr. 2.

Selanjutnya dipilih sebanyak 40 responden (usia 18-22 tahun) yang merupakan mahasiswa dari University of Michigan, yang mana memiliki berbagai pengalaman dengan *virtual acoustics*. Kepada setiap responden diperdengarkan hasil auralisasi dan diberikan pertanyaan yang sama untuk menunjukkan perbedaan dari sensasi pendengaran yang dirasakan pada setiap perubahan perlakuan akustik dalam ruang. Stimulus yang diberikan terdiri atas dua jenis yaitu auralisasi dari respons impuls berupa pidato singkat di *anechoic chamber* (tersedia di dalam perangkat lunak) dan berupa cuplikan gubahan Mozart oleh *string quartet*. Stimulus yang diperdengarkan kepada responden menggunakan *stereophonic headphone* dengan tingkat level bunyi sekitar 60 dB(A). Instruksi diberikan melalui layar komputer berupa

slide presentasi dengan stimulus yang telah ditanamkan di dalamnya. Selanjutnya, responden mengisi kuesioner untuk mengekspresikan sensasi pendengaran mereka.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

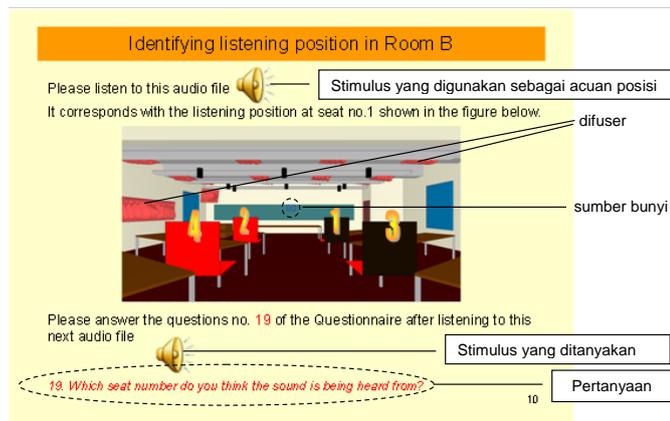
Hasil simulasi dan evaluasi subjektif menunjukkan bahwa peningkatan koherensi tidak mempengaruhi kualitas akustik pada lokasi tertentu, yang ditunjukkan oleh perbandingan nilai parameter pada Gbr. 5.



Gbr. 5 Perbandingan nilai objektif dan respons subjektif dari perubahan desain ruang tanpa *diffuser* dengan ruang modifikasi E (semua *diffuser* terpasang).

Sumber dan penerima bunyi dijaga pada kondisi yang tetap, sementara perlakuan akustik pada ruangan diubah-ubah. Peningkatan difusivitas sebesar 11% dari kondisi awal diperoleh pada modifikasi E. Di setiap posisi, setidaknya

terdapat empat posisi mendengarkan yang telah dirancang dalam skenario auralisasi. Posisi ini dapat dilihat di salah satu *slide* presentasi yang digunakan dalam evaluasi subjektif, seperti ditunjukkan pada Gbr. 6.



Gbr. 6 Posisi mendengarkan relatif terhadap sumber bunyi. Kursi 1: depan-kanan, kursi 2: depan-kiri, kursi 3: belakang-kanan, kursi 4: belakang-kiri.

A. Evaluasi Pengaruh Diffuser

Evaluasi didasarkan pada stimulus yang ditanamkan pada auralisasi dari dua posisi tertentu, dengan rincian hasil sebagai berikut.

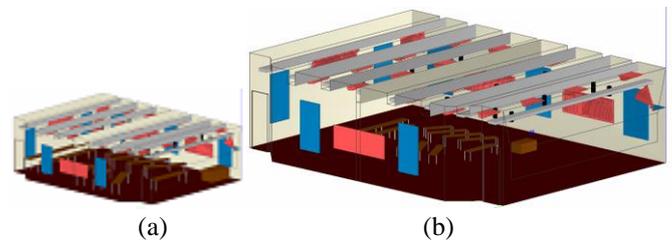
1) *Evaluasi pada isyarat visual dan pendengaran untuk lokalisasi bunyi:* Ketika difusivitas meningkat, maka kemampuan responden untuk menentukan sumber bunyi akan menurun (kecuali penentuan sumber bunyi langsung dan jarak persepsi) [14], [15]. Semua responden mampu menemukan arah sumber dari kedua kursi di model acuan (*baseline model*) dan model modifikasi E. Pertanyaan menggunakan *slide* presentasi dengan stimulus yang tertanam sebagaimana ditunjukkan di Gbr. 5. Ketika jarak antara sumber dengan penerima bunyi bertambah, semua responden masih mampu menemukan arah sumber bunyi. Hasil evaluasi subjektif menunjukkan bahwa 80% responden mampu menentukan arah datangnya sumber bunyi dengan benar di dalam ruang model acuan. Sementara itu, untuk ruang modifikasi E, sekitar 92.5% yang benar menentukan posisi arah datangnya sumber bunyi tersebut. Fakta bahwa responden memiliki tingkat kesulitan yang lebih rendah untuk mengidentifikasi arah sumber bunyi atau kemampuan lokalisasi bunyi yang lebih baik dikarenakan peran *diffuser* dalam meningkatkan pantulan awal.

2) *Difusivitas dan kualitas pendengaran:* Pidato digunakan untuk tujuan tertentu. Gbr. 6 menunjukkan bahwa 97,5% responden mengenali bunyi di dalam ruang kelas I modifikasi E, yakni ketika semua *diffuser* dipasang, menjadi lebih jelas terdengar. Selain itu, 85% responden mengindikasikan bahwa ruang tanpa *diffuser* menghasilkan bunyi yang lebih 'hidup' atau berdengung, dan ini sesuai dengan nilai waktu dengung yang lebih besar. Menambahkan panel *diffuser* telah menambah total absorpsi sebesar 10% sehingga nilai tekan bunyi total, SPL, berkurang sebesar 8%. Ternyata pengurangan nilai SPL sebesar ini tidak cukup menghasilkan

persepsi tingkat kekerasan bunyi yang signifikan, di mana hanya 40% responden yang mampu mengenali bunyi yang lebih keras di dalam ruang tanpa *diffuser* (model acuan).

B. Evaluasi Ruang Besar dan Kecil

Sifat-sifat akustik ruang lainnya tetap sama untuk evaluasi ini. Ruang kecil adalah ruang kelas I modifikasi E dengan volume sebenarnya yakni 332 m³. Sedangkan ruangan besar adalah ruangan kecil yang volumenya diperbesar dua kali, seperti diperlihatkan pada Gbr. 7.



Gbr. 7 (a) Ruang kelas I Modifikasi E ukuran sebenarnya, (b) Ruang kelas I Modifikasi E dua kali ukuran sebenarnya.

Perbedaan volume ruang melalui perbedaan persepsi bunyi stimulus di dalam kedua ruangan, dapat dikenali oleh sebanyak 85% responden. Persepsi ini didukung adanya penurunan yang signifikan pada nilai indeks kejelasan percakapan (*Speech Clarity Index/C50*) di ruangan besar, yakni sebesar 60%. Terkait juga adanya peningkatan nilai T30 dan EDT. Namun demikian, nilai koherensi tidak berubah, sehingga mengubah volume ruang menjadi dua kali lebih besar tidak mengubah sifat difusivitas medan bunyi pada posisi pendengar.

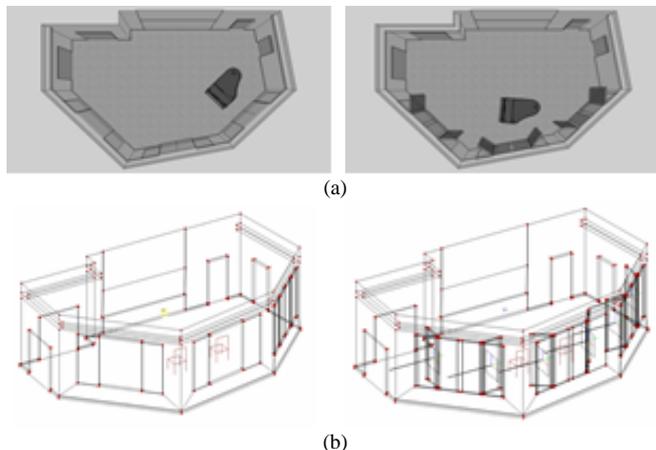
C. Evaluasi Persepsi Pendengaran dengan Adanya Kehadiran objek Fisik

Tujuan dari bagian studi ini adalah untuk memahami pengalaman pendengaran ketika subjek menghadapi berbagai benda-benda fisik saat mereka berada dalam ruang virtual. Sebuah ruang studio digunakan untuk menghasilkan stimulus yang diauralisasi dalam skenario virtual pada Gbr. 8. Atribut permanen dari ruangan dijaga agar tetap sama karena perubahan kondisi hanya difokuskan pada partisi, *furniture*, lampu, dan komponen lainnya. Studio rekaman memiliki panel tipe *adjustable panel* yang dapat dilipat. Perubahan yang dilakukan pada simulasi komputer adalah:

- panel terbuka, menunjukkan sisi absorptif;
- panel tertutup, menunjukkan sisi reflektif;
- panel terbuka 45⁰, berarti tidak terbuka sempurna, tidak sepenuhnya absorptif; dan
- panel tertutup 45⁰, berarti tidak tertutup sempurna, tidak sepenuhnya reflektif.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa panel-panel terbuka dan tertutup 45⁰ merupakan perubahan yang paling terukur secara objektif. Pada model-model ini, sebuah piano dimasukkan sebagai perubahan kondisi simulasi, kemudian hasil auralisasi dibandingkan dengan kondisi sebelumnya (tanpa piano).

Kehadiran piano mampu diidentifikasi oleh seluruh responden ketika panel terbuka 45° namun tidak dapat diidentifikasi ketika kondisi panel tertutup. Model studio rekaman dengan panel tertutup sudah dianggap sebagai ruang gama. Dengan studi kasus yang sama, kehadiran piano juga meningkatkan dengung namun masih pada tingkat yang mampu dikenali. Hal ini sudah jelas karena dengan memasukkan piano ke dalam ruangan, sama saja menambahkan permukaan yang lebih reflektif.



Gbr. 8 (a) Gambar CAD dari panel saat tertutup dan terbuka 45° , (b) Simulasi dengan model studio rekaman.

VI. KESIMPULAN

Untuk aplikasi lebih lanjut pada *audio game*, penambahan tingkat difusivitas mungkin tidak terlalu berdampak besar pada tugas kognitif tertentu yang terkait dengan arah dan persepsi jarak. Penambahan jumlah *diffuser* menambah 12,5% responden yang menebak dengan benar dari mana arah datangnya sumber bunyi. Namun demikian, perubahan signifikan tampak pada nilai kejelasan percakapan dan didukung oleh hasil evaluasi subjektif. Kenaikan nilai C_{50} sebesar 89% menunjukkan tingkat kejelasan percakapan yang lebih baik dan 97,5% responden mengenali kondisi ini.

Penilaian pada *auditory rendering* dari beberapa variasi ruang lain yang diamati menunjukkan perbedaan nyata yang diakibatkan oleh perubahan tiga parameter (difusivitas, ukuran ruang, dan keberadaan benda-benda fisik), terutama untuk ruang besar. Tingkat dampak yang ditimbulkan dari objek fisik yang terjadi di dalam ruang virtual tergantung pada faktor-faktor yang menjadikan ruang tersebut lebih hidup, ukuran objek relatif terhadap ukuran ruang, dan posisi objek dalam jalur suara. Temuan ini dapat mengeliminasi sejumlah variasi dalam model simulasi dengan memberikan wawasan sejauh apa pemodelan yang detail diperlukan.

Selain metode yang terintegrasi, *database* yang tersaji dalam penelitian dalam tulisan ini juga dapat memberikan pemahaman yang lebih baik bagi insinyur audio dan pengembang *computer gaming* tentang bagaimana unsur-unsur arsitektur yang lebih cenderung memberikan efek visual ternyata juga sangat mempengaruhi efek pendengaran. Hubungan antara penyajian visual di dalam ruang virtual 3 dimensi dengan sensasi pendengaran yang lebih nyata dari

hasil auralisasi serta perbandingan antara teknik evaluasi subjektif konvensional (penanaman *soundfile* dalam *slide presentasi*) dan terintegrasi teknologi *virtual acoustic reality* (yang memungkinkan sensasi kehadiran responden di dalam ruang simulasi 3D) akan disajikan dalam tulisan selanjutnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada pihak pengelola beberapa fasilitas atau gedung di University of Michigan, Ann Arbor, USA, yang telah bersedia digunakan sebagai studi kasus dalam penelitian ini. Penelitian juga terlaksana karena bantuan peralatan dan perangkat lunak dari Acoustic Camera, terima kasih atas bantuannya.

REFERENSI

- [1] Sued, C., N. Bonneel, et al., "The Role of Auditory-Visual Integration in Object Recognition.", *The Journal of the Acoustical Society of America* 123(5): 3568-3568, 2008.
- [2] Lauter, J., E. Mathukutty, et al., "How can a video game cause panic attacks? 1. Effects of an auditory stressor on the human brainstem." *Proceedings of Meetings on Acoustics* 8(1): 050001-18, 2009.
- [3] Vorländer, M., "Simulation of the Transient and Steady-State Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray Tracing/Image-Source Algorithm.", *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989.
- [4] Braasch, J., W. L. Martens, et al., "Acoustic rendering of a virtual environment based on virtual microphone control and binaural room scanning.", *The Journal of the Acoustical Society of America* 120(5): 3095, 2006.
- [5] Funkhouser, T., I. Carlbom, et al., "Interactive acoustic modeling of complex environments.", *The Journal of the Acoustical Society of America* 105(2): 1357-1358, 1999.
- [6] Lentz, T., Schroder, D., Vorlander, M., and Assenmacher, I., "Virtual Reality System with Integrated Sound Field Simulation and Reproduction." *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing Article ID 70540: 19 pages*, 2007.
- [7] T. Lokki, et al., "A Case Study of Auditory Navigation in Virtual Acoustic Environments", *Proc. 6th Int'l Conf. Auditory Display, 2000, Int'l Community of Auditory Display*, pp. 145-150, 2000.
- [8] Sahrhage, J., "Design criteria for auditory virtual environment." *The Journal of the Acoustical Society of America* 105(2): 981, 1999.
- [9] Vorlander, M. and SpringerLink, *Auralization Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [10] Lehnert, H. and J. Blauert, "Principles of binaural room simulation." *Applied Acoustics* 36(3-4): 259-291, 1992.
- [11] Hodgson, M., "On measures to increase sound-field diffuseness and the applicability of diffuse-field theory", *The Journal of the Acoustical Society of America* 95, 3651-3653, 1994.
- [12] (2003) Michigan State University Acoustics/Pschoacoustics website [Online], <http://www.pa.msu.edu/acoustics/>.
- [13] Schroeder, M. R., "Frequency-Correlation Functions of Frequency Responses in Rooms", *The Journal of the Acoustical Society of America* 34, 1819-1823, 1962.
- [14] Hartmann, W. M., "Localization of sound in rooms", *The Journal of the Acoustical Society of America* 74(5): 1380-1391, 1983.
- [15] Rakerd, B. and W. M. Hartmann, "Localization of sound in rooms, II: The effects of a single reflecting surface.", *The Journal of the Acoustical Society of America* 78(2): 524-533, 1985.