

Desain Sistem Pengukuran Respon Impuls Ruangan Dan Waktu Dengung Ruangan Dengan Multisensor

1st Reza Fauzy Akbar
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
rezafak@telkomuniversity.ac.id

2nd Fiky Yosef Suratman
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
fikyyosef@telkomuniversity.ac.id

3rd Agung Surya Wibowo
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
agungsw@telkomuniversity.ac.id

Abstrak— Respon impuls ruangan dapat menjadi salah satu parameter akustik dari suatu ruangan. Dari respon impuls dapat diamati pantulan-pantulan yang terjadi didalam ruangan yang diterima pada tiap posisi pendengar. Respon impuls ruangan dapat digambarkan dalam tingkat tekanan suara terhadap waktu. Dari penggambaran tersebut terlihat suara yang diterima tiap pendengar seperti suara langsung, pantulan awal, dan suara dengung. Respon impuls juga dapat digunakan untuk menghitung waktu dengung ruangan. Pengukuran waktu dengung ruangan harus memiliki berbagai titik perekaman agar dapat diketahui rata-rata waktu dengungnya. Pengukuran biasanya menggunakan satu buah mikrofon yang dipindah-pindahkan sesuai titik perekaman yang ditentukan. Cara tersebut dirasa memakan waktu yang cukup lama untuk ruangan yang sangat besar. Dengan menggunakan beberapa alat perekam sekaligus dalam satu kali eksitasi suara, akan lebih mempersingkat waktu pengukuran waktu dengung. Dalam penelitian ini penulis mengimplementasikan pengukuran respon impuls menggunakan sinyal *sine sweep* sebagai sinyal eksitasi ruangan. Perhitungan dekonvolusi antara sinyal *inverse sine sweep* dengan sinyal rekaman akan menghasilkan grafik impuls dari ruangan. Hasil impuls ini dapat dilanjutkan untuk mendapatkan harga waktu dengung ruangan menggunakan metode Schroeder. Hasil dari pengukuran di Masjid Syamsul Ulum didapat harga waktu dengung $T_{60} = 0,705$ detik, dan ruangan kelas N307 didapat $T_{60} = 1,166$ detik.

Kata Kunci — respon impuls ruangan, waktu dengung, *sine sweep*.

Abstract—Room impulse response can be one of the acoustic parameters of a room. From the impulse response, it can be observed that the reflections that occur in the room are received at each listener's position. Room impulse response can be described in terms of sound pressure level with time. From this description, it can be seen that the sound received by each listener is direct sound, initial reflection, and buzzing sound. The impulse response can also be used to calculate the reverberation time of a room. The room reverberation time measurement must have various recording points in order to know the average reverberation time. Measurements usually use a microphone that is moved according to the specified recording point. This method is considered to take quite a long time for a very large room. By using several recording devices at once in one sound excitation, it will shorten the reverberation time measurement time. In this research, the writer implements the measurement of impulse response using a *sine sweep* signal as a room excitation signal. The deconvolution calculation between the *inverse sine sweep* signal and the recorded signal will produce an impulse graph from the room. The results of this impulse can be continued to get the reverberation time value of the room using the Schroeder method. The results of measurements at the Syamsul Ulum Mosque obtained the reverberation time value of $T_{60} = 0.705$ seconds, and the class room N307 obtained $T_{60} = 1.166$ seconds.

Keyword— room impulse responses, reverberation time, *sine sweep*.

I. PENDAHULUAN

Ruangan kelas dan masjid kampus adalah 2 tempat yang sering digunakan untuk kegiatan kampus dalam belajar mengajar dan kegiatan keagamaan. Kegiatan tersebut seringkali diikuti oleh banyak orang untuk mendengarkan *speech* dari pengisi acara. Penyampaian informasi dari pengisi acara tentu yang dibutuhkan oleh audiens yang datang, maka penting kenyamanan dan kejelasan suara yang didengar oleh audiens. Kualitas suara dari suatu ruangan dapat diketahui dengan mengukur salah satu parameter akustik ruang yang biasa digunakan yaitu, waktu dengung (*Reverberation time*).

Waktu dengung merupakan selang waktu yang dibutuhkan oleh suatu gelombang bunyi untuk meluruh sebesar 60 dB dimulai saat sumber suara dihentikan. Dalam perkembangannya, waktu dengung tidak hanya didasarkan pada peluruhan 60 dB saja, tetapi juga pada suara langsung dan pantulan awal 10dB (EDT) atau peluruhan peluruhan yang terjadi kurang dari 60 dB, seperti 10 dB (EDT), 20 dB (RT20), dan 30 dB (RT30) [2]. Panjang pendeknya waktu dengung sangat menentukan kejelasan pembicara (*speech intelligibility*). Apabila semakin panjang waktu dengung maka penurunan kualitas *speech intelligibility* atau apabila terlalu pendek waktu dengung maka ruangan tersebut seperti 'kosong'.

Untuk pengukuran waktu dengung salah satunya menggunakan metode *integrated impulse response* [3]. respon impuls didapatkan dengan cara mengukur langsung sumber suara yang dieksitasi, seperti tembakan pistol, ledakan balon, *MLS*, *sine sweep*. Menggunakan metode ledakan balon atau tembakan pistol akan memiliki spektrum yang berbeda dari setiap percobaan, berbeda dengan metode *MLS* atau *sine sweep* yang memiliki spektrum yang sama dari setiap percobaan. Maka sekarang *sine sweep* dan *MLS* lebih sering digunakan untuk pengukuran respon impuls ruangan.

Pada beberapa penelitian sebelumnya, sistem pengukuran waktu dengung hanya menggunakan 1 sensor saja dan memindahkan ke setiap titik pengukuran. Cara tersebut dirasa dapat dimodifikasi dengan menggunakan beberapa sensor sekaligus dalam satu kali eksitasi sinyal suara.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian

ini dirancang untuk mendesain sebuah sistem untuk menentukan waktu dengung dari pengukuran respon impuls ruangan menggunakan beberapa sensor sekaligus di titik-titik ruangan.

II. KAJIAN TEORI

A. *Sine sweep*

Sinyal *sine sweep* memiliki sifat deterministik yang dimana sinyal sinusoidal dengan amplitude tertentu dan memiliki kandungan frekuensi yang berubah terhadap waktu yang telah di tentukan. Pada umumnya jenis sinyal *sine sweep* yang sering digunakan untuk pengukuran respon impuls yaitu *exponential sine sweep* (ESS). ESS mempunyai keunggulan jika dibandingkan menggunakan linear *sine sweep* seperti metode MLS.

Keunggulan menggunakan *sine sweep* dibanding metode pengukuran respon impuls lain, antara lain :

1. Dapat mengabaikan *noise* dibandingkan metode MLS, dengan memberikan sinyal yang sama Panjang.
2. Pemisahan yang mendekati sempurna dari efek nonlinear dari respon linear yang diinginkan dibanding dengan metode MLS. Hal ini disebabkan oleh metode ESS terbebas dari puncak-puncak palsu pada sinyal akibar distorsi ketika menggunakan metode MLS.
3. Untuk sistem yang memiliki variasi waktu, seperti yang melibatkan propagasi suara di udara dapat menghilangkan kesalahan fase pada frekuensi tinggi.

Menghindari masalah time-aliasing yang biasanya dialami oleh metode MLS akibat konvolusi linear yang aperiodik. Sinyal ESS yang digunakan untuk eksitasi ruang dapat dinyatakan dalam domain waktu kontinu.

Sinyal ESS yang di eksitasi dalam ruangan dapat dinyatakan dalam domain waktu sebagai berikut [4] :

$$s(t) = \sin[\theta(t)] = \sin \left[K(e^{-\frac{t}{L}} - 1) \right]$$

Dimana

$$K = \frac{\omega_1 T}{\ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)}, L = \frac{T}{\ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)}$$

Keterangan :

T = Durasi *sine sweep*

ω_1 = frekuensi terendah

ω_2 = frekuensi tertinggi

Penggunaan batas frekuensi ini agar dapat menyesuaikan dengan spesifikasi speaker dan mikrofon sehingga mendapatkan hasil respon impuls yang maksimal.

B. Respon impuls ruangan

Respon impuls suatu ruangan didefinisikan sebagai sinyal suara yang diterima oleh suatu titik (titik penerima,

B) dalam ruangan akibat suatu sumber suara impuls pada titik lain (titik sumber, A) didalam ruangan. Sinyal-sinyal yang diterima oleh titik B dapat dibagi menjadi :

1. Suara langsung

Sinyal suara yang datang dalam satu garis lurus dari sumber suara ke penerima membentuk komponen suara langsung pada respon impuls ruangan.

2. Pantulan dini

Sinyal suara berasal dari pantulan dinding, langit, dan sebagainya (biasanya arah perambatannya dapat diidentifikasi dengan jelas) disebut sebagai komponen pantulan dini pada respon impuls akustik. M. Barron mendefinisikan pantulan dini sebagai sinyal suara yang datang dalam batas waktu 100 ms setelah suara langsung, sementara L.L. Baranek memberikan batas 80 ms.

3. Suara dengung

Sinyal suara yang telah mengalami pantulan berkali-kali sebelum mencapai penerima membentuk komponen suara dengung pada respon impuls ruangan. Sinyal suara yang datang tersebut letaknya sangat berdekatan sehingga selang waktu anataranya tidak dapat dibedakan. Pada kurva respon impuls ruangan, bagian suara dengung ini memberikan bentuk kurva yang meluruh pada bagian akhir kurva respon impuls ruangan.

C. Reverberation time

Waktu dengung adalah yang paling umum digunakan dalam hal respon impuls ruangan. Biasanya disebut T60, parameter ini menunjukkan waktu yang dibutuhkan energi suara untuk meluruh sebesar 60 dB dalam ruangan perekaman. Dalam perkembangannya tidak hanya T60 saja, ada pula pantulan awal (EDT) atau peluruhan-peluruhan selain 60 dB (T60), seperti 20 dB (T20), 30 dB (T30). [8]

Parameter ini biasanya dihitung dari *Energy Decay Curve* (EDC) dengan menggunakan integrasi metode Schroeder. EDC dapat didefinisikan sebagai ekor integral dari kuadrat respon impuls h pada waktu t :

$$EDC(t) \triangleq \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau$$

Keterangan :

EDC(t) : kurva energi

$h^2(\tau)$: Rata-rata respon impuls

Karena ini mewakili total energi sinyal yang tersisa dari respon impuls pada waktu t , maka T60 dapat diekstraksi, dalam hitungan detik, dari $10\log_{10}$ EDC, secara sederhana nilai t dimana peluruhan mencapai -60dB. Dalam praktiknya, metrik ini sering salah perhitungan karena diperlukan rekaman yang dilakukan dengan mikrofon dengan jangkauan dinamis dan dengan ruang kepala yang cukup dari lantai kebisingan lingkungan. Untuk mengatasi kemungkinan masalah ini, metrik T30 dan T20 dihitung pada EDC dengan rentang peluruhan yang lebih kecil dimana pengukuran lebih mungkin akurat. Maka garis regresinya digunakan untuk mengekstrapolasi nilai waktu dengung T60 di sepanjang garis peluruhan yang pas. ISO 3382, standar menentukan kisaran peluruhan minimum 45 dB untuk T30 (dengan rentang regresi -10 dB hingga -40dB) dan kisaran peluruhan minimum 35dB untuk T20 (dengan regresi bersisar -10dB hingga -30dB). Memiliki rentang regresi mulai dari -5dB mengurangi pengaruh gangguan dari fluktuasi sinyal awal yang disebabkan oleh refleksi dan dengan demikian memberikan perkiraan yang lebih baik untuk T60. Demikian pula, *Early Decay Time* (EDT) dihitung dari EDC menggunakan garis regresi dari -5dB hingga -15dB. EDT adalah metrik yang relevan dengan psikoakustik, berguna untuk desain akustik ruangan. Sejak persepsi gema tidak linier, penurunan tajam di awal peluruhan energi sering menjadi penyebab makhluk luar angkasa dianggap sebagai “dryer” daripada yang sebenarnya.

III. METODE

A. Diagram Blok Sistem

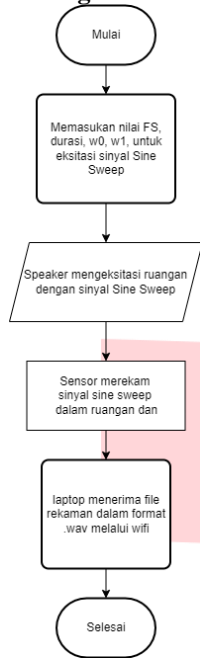


GAMBAR 3.2 Diagram Blok Sistem

Diagram blok desain sistem respon impuls ruangan dapat dilihat pada gambar 3.2 input diperoleh dari sinyal *sine sweep* yang dieksitasi menggunakan speaker yang mana direkam oleh sensor. Sensor mengirimkan *file* rekaman dalam bentuk ‘.wav’ melalui jaringan nirkabel ke laptop. Akan ada dua *file* berbeda dari sensor yang berbeda, maka nanti sistem dapat memilih *file* mana yang akan dibuka dan diolah hingga mendapatkan nilai impuls

beserta nilai waktu dengungnya.

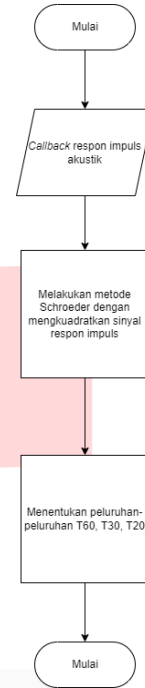
B. Desain Perangkat Lunak



GAMBAR 3.5 Diagram alir proses eksitasi

Pada gambar 3.5 dapat dilihat bahwa sistem pengukuran respon impuls ruangan diawali dengan adanya eksitasi dari sumber suara (sinyal *sine sweep*) yang direkam oleh sensor menjadi sinyal respon ruangan (rekaman sensor). Sinyal rekaman dikirim oleh sensor ke laptop melalui jaringan nirkabel.

Di gambar 3.6 menjelaskan adanya dua input dari sinyal *sine sweep* dengan file rekaman dari sensor. Sinyal *sine sweep* di-inverse agar nantinya bisa didekonvolusi dengan sinyal rekaman.



GAMBAR 3.7 Diagram Alir Proses Pengukuran

Waktu Dengung

Di gambar 3.7 Memanggil kembali respon impuls ruangan sebagai *input*, untuk perhitungan waktu dengung dengan metode Schroeder dengan mengkuadratkan sinyal respon impuls. Lalu menentukan peluruhan dari EDT, T60, T30, T20.

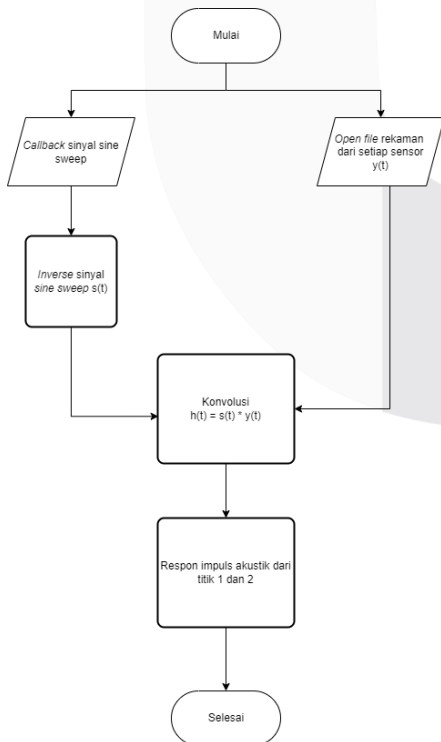
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Waktu Dengung

Pengujian dilakukan dengan harga waktu dengung yang berbeda-beda pada rentang 0,5 sampai 4 detik. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel 4.1 dibawah ini:

TABEL 4.1 Hasil pengujian waktu dengung dengan T60 acuan dari rentang 0,5 sampai 4 detik menggunakan metode Schroeder

$T60_{acuan}$ dalam detik	$T60_{TERUKUR}$ dalam detik
0,5	0,4989
1	0,9985
1,5	1,4983
2	1,9983
2,5	2,4961
3	2,9868



GAMBAR 3.6 Diagram Alir Proses Pengukuran Respon Impuls

3,5	3,4390
4	3,8330

Dari hasil pengujian harga waktu dengung acuan dengan terukur didapatkan nilai keakuratan program T60 sebesar 99,11 %. Dapat disimpulkan bahwa program yang dibuat dapat digunakan untuk diaplikasikan pengukuran pada ruangan.

TABEL 4.2 Hasil pengujian waktu dengung dengan T30 acuan dari rentang 0,5 sampai 4 detik menggunakan metode Schroeder

T30 _{acuan} dalam detik	T30 _{TERUKUR} dalam detik
0,5	0,4957
1	0,9078
1,5	1,4975
2	1,9980
2,5	2,4908
3	2,9222
3,5	3,6776
4	3,9998

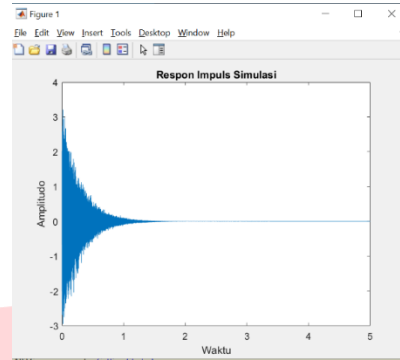
TABEL 4.3 Hasil pengujian waktu dengung dengan T20 acuan dari rentang 0,5 sampai 4 detik menggunakan metode Schroeder

T20 _{acuan} dalam detik	T20 _{acuan} dalam detik
0,5	0,4909
1	0,9880
1,5	1,4996
2	1,9990
2,5	2,4885
3	2,9990
3,5	3,4965
4	4,0199

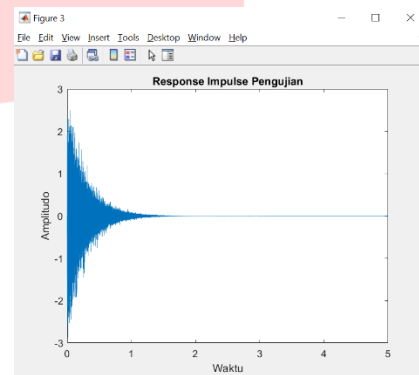
Dari hasil pengujian harga waktu dengung acuan dengan terukur didapatkan nilai keakuratan program T20 sebesar 99,47 % dan T30 sebesar 97,73% . Dapat disimpulkan bahwa program yang dibuat dapat digunakan untuk diaplikasikan pengukuran pada ruangan.

B. Hasil Pengujian Respon Impuls

Dibawah ini merupakan data pengujian respon impuls dari data rekaman yang disimulasikan dari pengukuran waktu dengung ditambah *sine tone*.



GAMBAR 4.3 Grafik respon impuls simulasi dengan (T60_{acuan} = 2 detik)

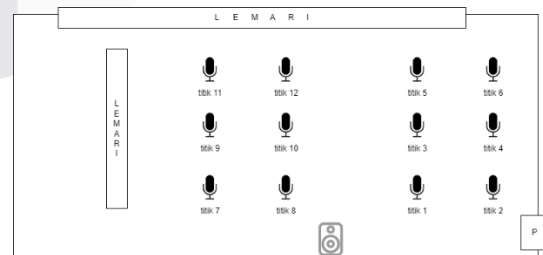


GAMBAR 4.4 Grafik respon impuls terukur dengan T60_{acuan} = 2 detik

Dari kedua gambar 4.3 dan 4.4 apabila dibandingkan dan dilihat dengan sekilas tidak terlalu ada perbedaan bentuk grafik yang signifikan. Maka program yang telah dibuat dapat digunakan untuk diaplikasikan pengukuran pada ruangan

C. Hasil Pengukuran pada Ruang Kelas N307

Berikut ini adalah hasil dari pengukuran waktu dengung yang dilakukan pada ruangan. Pengukuran dilakukan di N307 Teknik Elektro, Universitas Telkom. Pengukuran dilakukan sebanyak 12 titik, denah setiap titik dapat dilihat pada gambar 4.5 dibawah ini :

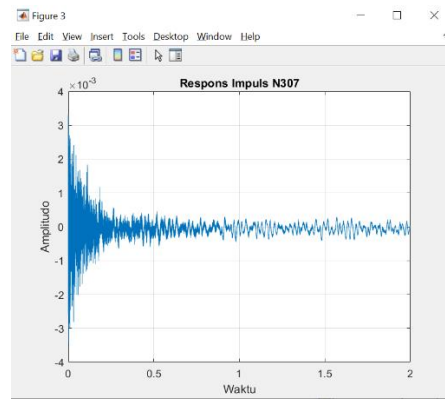


GAMBAR 4.5 Denah Pengukuran N307

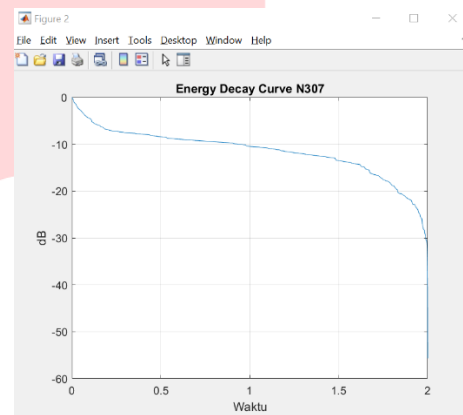
Setelah dilakukan beberapa kali pengukuran didapatkan harga waktu dengung dari setiap titik pengukuran, beserta peluruhan selain T60. Hasil dapat dilihat pada tabel 4.2 dibawah ini:

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran waktu dengung pada ruangan kelas N307

T60 (0dB – 60dB)	T30 (30dB – 60dB)	T20 (10dB – 30dB)	EDT (0dB – 10dB)
NaN	0,0437	1,0527	0,9369
NaN	0,0163	0,2473	1,7432
NaN	0,0437	1,0527	0,9369
NaN	0,0163	0,2473	1,7432
2	0,1174	0,8371	1,1234
2	0,3945	0,6930	1,1818
1,9990	0,3505	0,7655	1,1162
1,9997	0,4823	1,1320	0,7204
1,9998	0,3371	1,6633	0,2346
NaN	NaN	0,0668	1,9319
1,9998	0,4588	0,8019	1,0193
1,9999	0,2914	1,6491	0,2325



GAMBAR 4.7 Grafik respon impuls di ruangan N307



GAMBAR 4.8 Grafik EDC di ruangan N307

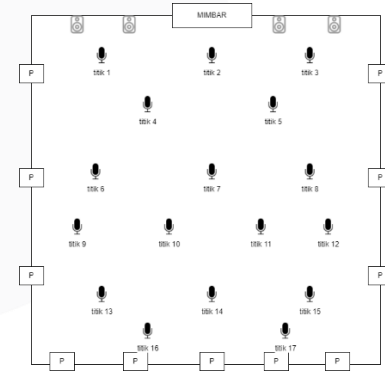
Dari hasil pengukuran diatas didapat beberapa T60 yang tidak terdefinisi dikarenakan kurva energi tidak sampai 60 dB sehingga tidak menampilkan harga waktu dengungnya. Apabila dirata-ratakan setiap titik pengukuran waktu dengung, maka didapatkan T60 = 1,166 detik , T30 = 0,2126 detik, T20 = 0,8507 detik, EDT = 1,0766 detik.

Sebagaimana terlihat pada gambar 4.5, terlihat bahwa ruangan terdiri dari berbagai macam bahan yang menghasilkan medan suara berbeda-beda dari satu sektor titik ukur terhadap sektor titik ukur lainnya.

Salah satu respon impuls dan EDC yang dihasilkan dari beberapa hasil perekaman di ruangan kelas N307, sebagai berikut :

D. Hasil Pengukuran pada Masjid Syamsul Ulum

Berikut ini adalah hasil dari pengukuran waktu dengung yang dilakukan pada ruangan lantai 1 Masjid Syamsul Ulum, Universitas Telkom. Pengukuran dilakukan sebanyak 17 titik, denah setiap titik dapat dilihat pada gambar 4.9 dibawah ini:



GAMBAR 4.9 Denah pengukuran di MSU

Setelah dilakukan beberapa kali pengukuran didapatkan harga waktu dengung dari setiap titik pengukuran, beserta peluruhan selain T60. Hasil dapat dilihat pada tabel 4.3 dibawah ini:

TABEL 4.5 Hasil Pengukuran waktu dengung pada Masjid Syamsul Ulum

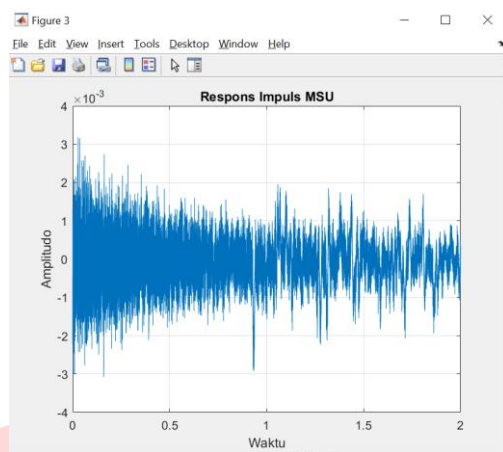
T60	T30	T20	EDT
-----	-----	-----	-----

NaN	NaN	0,2442	1,7531
NaN	NaN	0,3033	1,6925
NaN	0,0044	0,2092	1,7890
2	0,0052	0,2294	1,7672
NaN	NaN	0,2442	1,7531
2	0,0071	0,1806	1,8176
NaN	NaN	0,3298	1,6661
NaN	NaN	0,4171	1,5784
NaN	NaN	0,2887	1,7083
NaN	NaN	0,3669	1,6286
2	0,0222	0,5280	1,4553
NaN	NaN	0,5613	1,4307
NaN	0,0064	0,3246	1,6722
NaN	0,0085	0,3085	1,6890
2	0,0183	0,3838	1,6103
2	0,0159	0,3808	1,6122
2	0,0228	0,5569	1,4346

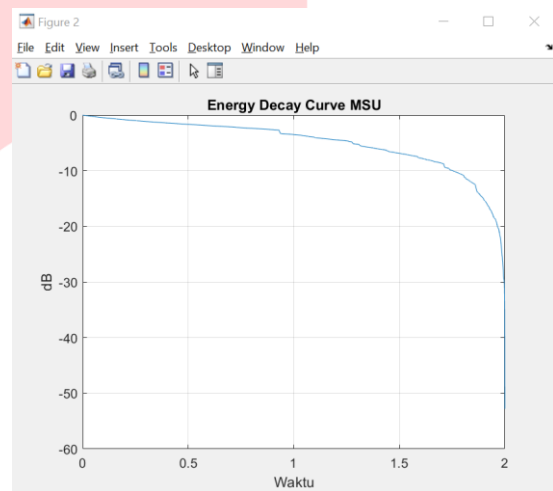
Dari hasil pengukuran diatas didapat beberapa T60 yang tidak terdefinisi dikarenakan kurva energi tidak sampai 60 dB sehingga tidak menampilkan harga waktu dengungnya. Apabila dirata-ratakan setiap titik pengukuran waktu dengung, maka didapatkan T60 = 0,705 detik , T30 = 0,0065 detik, T20 = 0,3445 detik, EDT = 1,6504 detik.

Sebagaimana terlihat pada gambar 4.9, terlihat bahwa ruangan terdiri dari berbagai macam bahan yang menghasilkan medan suara berbeda-beda dari satu sektor titik ukur terhadap sektor titik ukur lainnya.

Salah satu respon impuls dan EDC yang dihasilkan dari beberapa hasil perekaman di Masjid Syamsul Ulum, sebagai berikut :



GAMBAR 4.10 Grafik respon impuls di MSU



GAMBAR 4.11 Grafik EDC di MSU

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Terdapat beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari pengujian pada Tugas Akhir ini, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Dari pengujian didapatkan parameter akustik dari waktu dengung dengan macam peluruhan, di Masjid Syamsul Ulum didapat rata-rata peluruhan T60 = 0,705 detik , T30 = 0,0065 detik, T20 = 0,3445 detik, EDT = 1,6504 detik.. Dan di Ruang kelas N.307 didapat rata-rata peluruhan T60 = 1,166 detik , T30 = 0,2126 detik, T20 = 0,8507 detik, EDT = 1,0766 detik. Hasil pengukuran dari kedua tempat memiliki harga waktu dengung yang masih jauh dari standar yaitu kurang lebih untuk peluruhan T60 tidak lebih dari 1 detik dan tidak terlalu jauh dari 1 detik.
2. Penggunaan dua sensor dengan koneksi wifi kurang efektif yang dimana akan selalu ada *delay* dibagian awal ataupun akhir rekaman, dan *delay* tidak menentu.

B. Saran

Terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan sebagai pengembangan pengujian pada Tugas Akhir ini, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Mengembangkan kontrol sensor menggunakan server/PC/Laptop.
2. Diperlukan alat SLM (*Sound Level Meter*) sebagai nilai acuan.
3. Dapat ditambahkan beberapa fitur tambahan seperti adanya pengukuran respon impuls menggunakan sinyal *MLS*.
4. Dapat menggunakan *software* yang berbeda untuk perhitungan respon impuls, selain MATLAB.

REFERENSI

- [1] "https://www.konsultasi-akustik.com/pengukuran-parameter-akustik-berdasarkan-iso-3382-1/."
- [2] SULAEMAN, "PENGUKURAN RESPON IMPULS PADA RUANGAN BERBASIS KOMPUTER," 2008.
- [3] Y. Wahyudin, "PENGUKURAN WAKTU DENGUNG RUANGAN BERBASIS KOMPUTER," 2008.
- [4] "https://www.mystudio.co.id/detail-blog-reverberation-time--waktu-dengung-parameter-wajib--43.html."
- [5] Music 318, "Impulse Response Measurement," 2007.
- [6] O. Binti, M. Rohmah, J. Fisika, F. Matematika, D. Ilmu, and P. Alam, "ANALISIS WAKTU DENGUNG (REVERBERATION TIME) PADA RUANG KULIAH B III.01 A FMIPA UNS SURAKARTA."
- [7] A. Gumelar, G. A. Pauzi, and A. Surtono, "Perancangan Instrumentasi Monitoring Kualitas Akustik Ruang Berdasarkan Tingkat Tekanan Bunyi dan Waktu Dengung," 2018.
- [8] S. A. Rahman, "PELACAkan SUMBER BUNYI BERGERAK BAWAH AIR BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA MENGGUNAKAN HYDROPHONE ARRAY," Institut Teknologi Sepuluh November, 2016.
- [9] H. C. Indrani, J. Arsitektur, T. Sipil, D. Perencanaan, J. T. Fisika, and T. Industri, "ANALISIS KINERJA AKUSTIK PADA RUANG AUDITORIUM MULTIFUNGSI Studi kasus: Auditorium Universitas Kristen Petra, Surabaya Sri Nastiti N. Ekasiwi Wiratno A. Asmoro." [Online]. Available: <http://puslit.petra.ac.id/journals/interior>
- [10] A. Farina, "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/277293870>
- [11] J. Vanasse, A. Genovese, and A. Roginska, "Multichannel Impulse Response Measurements in MATLAB: An Update on ScanIR HoloDeck View project Ambisonic MEMS Mic View project Multichannel Impulse Response Measurements in MATLAB: An Update on ScanIR." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/336371006>
- [12] Barron, M. (1984). *Impulse Testing Techniques for Auditoria. Applied Acoustics.*

