

PENENTUAN CIRI-CIRI AKUSTIK BILIK DENGAN KAEDAH RUMUS
SABINE SECARA SIMULASI

AZRIL BIN AZALAN

Tesis ini dikemukakan sebagai
Memenuhi syarat penganugerahan
Ijazah Sarjana

FAKULTI KEJURUTERAAN MEKANIKAL DAN PEMBUATAN
UNIVERSITI TUN HUSSAIN ONN MALAYSIA

Disember 2013

ABSTRAK

Kajian ini bertujuan mengkaji kemampuan rumus Sabine untuk menjangkakan masa gemaan di dalam kawasan tertutup. Rumus Sabine dibandingkan dengan rumus-rumus seperti Eyring, Millington-Sette dan pengukuran di bilik sebenar. Bilik yang digunakan sebagai kawasan pengukuran terdiri dari pelbagai bentuk dan ciri. Ia adalah untuk melihat kecekapan rumus-rumus ini menjangkakan masa gemaan di bilik-bilik tersebut terutama rumus Sabine. Bilik-bilik ini terletak di kawasan UTHM. Rumus Sabine juga digunakan untuk meramal pekali serapan bahan dengan cara balikan rumus. Rumus Sabine seterusnya digunakan di dalam aplikasi kajian yang dibina untuk meramalkan masa gemaan dan pekali serapan. Pengukuran di bilik sebenar adalah menggunakan kaedah ISO 3382 iaitu kaedah gangguan bunyi. Analisis masa gemaan menunjukkan hampir keseluruhan bilik mencatatkan nilai dibawah 30% nilai perbezaan purata kecuali bilik kuliah E15-3 dan bilik D1 berlangsir. Analisis pekali serapan mendapati terdapat hanya dua bilik kajian yang mencatatkan nilai perbezaan pekali serapan melebihi 30% iaitu Bilik Kuliah D1 berlangsir dan Bilik Kuliah D1 ketika menggunakan bekas telur sebagai bahan penebat bunyi. Aplikasi kajian yang dibina telah dibandingkan dengan aplikasi pengiraan masa gemaan SAE. Keputusan menunjukkan purata kecekapan yang diperolehi aplikasi kajian bernilai 84.95% manakala aplikasi SAE mencatatkan nilai 54.32%. Daripada analisis didapati aplikasi kajian relevan digunakan kerana menghasilkan kecekapan 70% keatas dalam jangkaan masa gemaan dan pekali serapan bahan serta kemampuannya menjangkakan masa gemaan mengatasi aplikasi pengiraan masa gemaan yang diguna oleh SAE Institute.

KANDUNGAN

	TAJUK	i
	PENGAKUAN	ii
	ABSTRAK	iii
	KANDUNGAN	iv
	SENARAI JADUAL	x
	SENARAI RAJAH	xiii
	SENARAI SIMBOL	xx
BAB 1	PENGENALAN	1
	1.1 Pernyataan masalah	3
	1.2 Matlamat kajian	4
	1.3 Objektif kajian	4
	1.4 Skop kajian	4
	1.5 Hasil kajian	5
BAB 2	KAJIAN LITERATUR	6
	2.1 Pengenalan	6

2.2	Peranan frekuensi dalam akustik bilik	7
2.3	Bahan serapan bunyi	9
2.3.1	Pekali serapan	11
2.4	Gemaan	12
2.4.1	Masa gemaan	13
2.4.2	Peranan fizikal bilik terhadap gemaan	14
2.4.3	Pengukuran masa gemaan	15
2.4.4	Pengiraan menggunakan rumus klasik	17
2.4.5	Penggunaan rumus Sabine di dalam kaedah kajian	18
BAB 3	METODOLOGI	20
3.1	Pengenalan	20
3.2	Carta alir	21
3.3	MATLAB untuk pembinaan kaedah kajian	22
3.4	Rumus yang digunakan oleh kaedah kajian	22
3.5	Ciri-ciri kaedah kajian	23
3.5.1	Aplikasi pengiraan masa gemaan	24
3.5.2	Aplikasi pemilihan bahan serapan bunyi	29
3.5.3	Cara penggunaan kaedah kajian	32

3.6	Pembuktian kaedah kajian	40
3.6.1	Bilik kajian	41
3.6.1.1	Bilik Kuliah 21	41
3.6.1.2	Bilik Kuliah E15-3	43
3.6.1.3	Bilik Kuliah B2	44
3.6.1.4	Bilik Kuliah E3	45
3.6.1.5	Bilik Kuliah Fakulti Pengurusan Teknikal 7 (FPT7)	47
3.6.1.6	Bilik pensyarah D1	48
3.6.2	Langkah pengukuran dijalankan	49
3.6.3	Pengukuran bilik bersudut	52
3.6.4	Pengukuran aras bunyi dalam kadar yang berbeza	53
3.6.5	Analisis masa gemaan dan pekali serapan bahan	54
3.6.6	Perbandingan kecekapan aplikasi	54
BAB 4	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	56
4.1	Pengenalan	56
4.2	Analisis masa gemaan	56

4.2.1	Bilik Kuliah 21	57
4.2.2	Bilik Kuliah E15-3	58
4.2.3	Bilik Kuliah B2	60
4.2.4	Bilik Kuliah E3	61
4.2.5	Bilik Kuliah FPT7	63
4.2.6	Bilik Pensyarah D1 (kosong)	65
4.2.7	Bilik Pensyarah D1 (langsir)	66
4.2.8	Bilik Pensyarah D1 (bekas telur)	68
4.2.9	Analisis ralat masa gemaan purata bilik kajian	70
4.3	Analisis masa gemaan bilik kuliah berlangsir	71
4.3.1	Bilik Kuliah 21	72
4.3.2	Bilik Kuliah E15-3	72
4.3.3	Bilik Kuliah B2	73
4.3.4	Bilik Kuliah E3	74
4.3.5	Bilik Kuliah FPT7	75
4.3.6	Bilik Pensyarah D1	75
4.3.7	Analisis purata perbezaan masa gemaan bilik-bilik kajian berlangsir	76

4.4	Analisis nilai pekali serapan	77
4.4.1	Bilik Kuliah 21	77
4.4.2	Bilik Kuliah E 15-3	79
4.4.3	Bilik Kuliah B2	80
4.4.4	Bilik Kuliah E3	82
4.4.5	Bilik Kuliah FPT7	83
4.4.6	Bilik D1 (kosong)	84
4.4.7	Bilik D1 (langsir)	86
4.4.8	Bilik D1 (bekas telur)	87
4.4.9	Analisis kadar ralat pekali serapan bilik kajian	89
4.5	Perbandingan SAE dan aplikasi kajian	90
4.5.1	Bilik Kuliah 21	90
4.5.2	Bilik Kuliah E 15-3	91
4.5.3	Bilik Kuliah B2	92
4.5.4	Bilik Kuliah E3	92
4.5.5	Bilik Kuliah FPT7	93
4.5.6	Bilik D1 (kosong)	94

4.5.7	Bilik D1 (langsir)	94
4.5.8	Bilik D1 (bekas telur)	95
4.5.9	Perbandingan kecekapan perisian	96
BAB 5	KESIMPULAN	97
5.1	Kesimpulan	97
5.2	Penambahbaikan untuk kajian akan datang	98
RUJUKAN		99

SENARAI SIMBOL/SINGKATAN/TATANAMA/ISTILAH

cm	-	Sentimeter
g/m^2	-	Gram per meter persegi
Hz	-	Hertz
ln	-	Neperian logaritma
m	-	Meter
m^2	-	Meter persegi
mm	-	Milimeter
RT	-	Masa gemaan
s	-	Saat
S	-	Luas permukaan
SAE	-	School of Audio Engineering
T_{60}	-	Pengurangan masa gemaan dalam 60 saat
V	-	Isipadu
$\bar{\alpha}$	-	Pekali serapan
GUI	-	Guide user interactive
ISO	-	International Organization for Standardization
MAE	-	Mean absolute error
UTHM-	-	Universiti Tun Hussain Onn Malaysia

SENARAI RAJAH

3.1	Carta alir perancangan projek	21
3.2	Paparan keseluruhan perisian pengiraan masa gemaan	23
3.3	Paparan keseluruhan perisian pengiraan pekali serapan bahan	24
3.4	Paparan Panel 1 perisian pengiraan masa gemaan dan kawasan yang perlu diisi oleh pengguna	25
3.5	Paparan Panel 2 perisian pengiraan masa gemaan. menunjukkan bahagian keterangan ringkas dan senarai pemilihan bahan	26
3.6	Paparan Panel 3 perisian pengiraan masa gemaan. menunjukkan bahagian pekali serapan dan graf perbandingan pekali serapan bahan	27
3.7	Paparan Panel 4 perisian pengiraan masa gemaan, menunjukkan bahagian hasil pengiraan masa gemaan mengikut frekuensi	28
3.8	Paparan Panel 1 perisian pengiraan pekali serapan bahan yang perlu diisi oleh pengguna	29
3.9	Paparan Panel 2 perisian pengiraan pekali serapan bahan	30
3.10	Paparan Panel 3 perisian pengiraan pekali serapan bahan dengan nilai pekali serapan bahan yang dipilih dan jangkakan pekali serapan bahan	30
3.11	Paparan Panel 4 perisian pengiraan pekali serapan bahan mengikut frekuensi	31

3.12	Paparan pemilihan bahan jangkaan berdasarkan nilai yang diperolehi dari perisian	31
3.13	Kawasan Panel 1 yang perlu diisi oleh pengguna pada bahagian permulaan perisian pengukuran masa gemaan	32
3.14	Nilai-nilai luas permukaan bahan haruslah diisi di ruang <i>textbox</i> mengikut label yang dipaparkan	33
3.15	Panel 2 menyenaraikan bahan-bahan pilihan dan keterangan ringkas mengenai bahan yang dipilih	33
3.16	Paparan nilai pekali serapan bahan yang dipilih pengguna. Apabila <i>push button</i> ditekan, kadar ketinggian pekali serapan dipaparkan	34
3.17	Memaparkan nilai kadar serapan berdasarkan frekuensi bahan yang dipilih	35
3.18	Paparan masa gemaan mengikut kadar frekuensi apabila <i>push button</i> ditekan	35
3.19	<i>Push button</i> yang perlu ditekan untuk ke perisian jangkaan pekali serapan bahan	36
3.20	Nilai masa gemaan dan luas permukaan bahan yang perlu diisi oleh pengguna	36
3.21	Ciri-ciri bilik iaitu tinggi, lebar dan panjang harus diisi oleh pengguna	37
3.22	Kawasan yang diisi dengan nilai luas permukaan bahan di dalam bilik	37
3.23	Kawasan pemilihan bahan di Panel 2	38
3.24	Paparan nilai pekali serapan di Panel 3	38

3.25	Nilai pekali serapan yang dipaparkan setelah <i>push button</i> ditekan	39
3.26	Senarai pekali serapan bahan mengikut frekuensi	39
3.27	Senarai bahan terpapar apabila nilai pekali serapan dipilih dari Panel 4	40
3.28	Bilik Kuliah 21	42
3.29	Ukuran Bilik Kuliah 21	42
3.30	Bilik Kuliah E15-3	43
3.31	Ukuran Bilik Kuliah E15-3	44
3.32	Bilik Kuliah B2	44
3.33	Ukuran Bilik Kuliah B2	45
3.34	Bilik Kuliah E3	46
3.35	Ukuran Bilik Kuliah E3	46
3.36	Bilik Kuliah FPT7	47
3.37	Ukuran Bilik Kuliah FPT7	48
3.38	Bilik Pensyarah D1 dalam tiga keadaan berbeza	48
3.39	Ukuran Bilik Pensyarah D1	49
3.40	Peralatan yang digunakan dari kiri pembesar suara <i>omnidirectional</i> Bruj Kjeaar, <i>microphone</i> dan <i>amplifier</i>	50

3.41	Lokasi mikrofon semasa pengukuran pengukuran dijalankan, iaitu A lokasi pertama, B lokasi ketiga, C lokasi kedua, D lokasi ketiga	51
3.42	Lokasi peralatan yang digunakan, iaitu A mewakili <i>microphone 1</i> , B <i>microphone 2</i> , C sumber bunyi	52
3.43	Garisan putus menunjukkan kawasan yang diukur tanpa mengambil kira permukaan bersudut	53
3.44	Garisan putus menunjukkan kawasan yang diukur jika mengambil kira permukaan bersudut	53
4.1	Graf MAE perbezaan masa gemaan antara kaedah pengiraan dan pengukuran di dalam Bilik Kuliah 21	58
4.2:	Graf MAE perbezaan masa gemaan antara kaedah pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah E15-3	59
4.3	Graf MAE perbezaan masa gemaan antara pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah B2	61
4.4	Graf MAE perbezaan nilai masa gemaan kaedah pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah E3	63
4.5	Graf MAE perbezaan masa gemaan kaedah pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah FPT7	64
4.6	Graf MAE perbezaan masa gemaan kaedah pengukuran dan pengiraan di Bilik Pensyarah D1 (kosong)	66
4.7	Graf MAE perbezaan masa gemaan kaedah pengukuran dan pengiraan di Bilik Pensyarah D1 (langsir)	67

4.8	Graf MAE perbezaan masa gemaan menggunakan pengukurandan pengiraan di Bilik Pensyarah D1 (bekas telur)	70
4.9	Graf nilai ralat perbezaan masa gemaan bilik kajian `	71
4.10	Nilai masa gemaan pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah 21 (langsir) dengan menggunakan rumus Sabine	72
4.11	Nilai masa gemaan pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah E15-3 (langsir) dengan menggunakan rumus Sabine	73
4.12	Nilai masa gemaan pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah B2 (langsir) dengan menggunakan rumus Sabine	73
4.13	Nilai masa gemaan pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah E3 (langsir) dengan menggunakan rumus Sabine	74
4.14	Nilai masa gemaan pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah FPT7 (langsir) dengan menggunakan rumus Sabine	75
4.15	Nilai masa gemaan pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah FPT7 (langsir) dengan menggunakan rumus Sabine	76
4.16	Nilai purata perbezaan masa gemaan bilik kajian (langsir)	76
4.17	Graf perbezaan pekali serapan di dalam Bilik Kuliah 21	78
4.18	Graf perbezaan pekali serapan bahan di dalam Bilik Kuliah E15-3	80
4.19:	Graf perbezaan masa gemaan di dalam Bilik Kuliah B2	81
4.20	Graf perbezaan pekali serapan bahan di dalam Bilik Seminar E3	82

4.21	Graf perbezaan pekali serapan bahan di dalam Bilik Kuliah FPT7	84
4.22	Graf perbezaan pekali serapan di dalam Bilik D1 (kosong)	86
4.23	Graf perbezaan pekali serapan di dalam Bilik D1 (langsir)	87
4.24	Graf perbezaan masa gemaan di dalam Bilik D1 (bekas telur)	88
4.25	Graf MAE ralat perbezaan pekali serapan di bilik kajian	89
4.26	Graf nilai perbezaan masa gemaan melawan frekuensi antara kaedah pengukuran dan aplikasi di Bilik Kuliah 21	90
4.27	Graf nilai perbezaan masa gemaan melawan frekuensi antara pengukuran dan aplikasi di Bilik Kuliah E15-3	91
4.28	Graf nilai perbezaan masa gemaan melawan frekuensi antara pengukuran dan aplikasi di Bilik Kuliah B2	92
4.29	Graf nilai perbezaan masa gemaan melawan frekuensi antara pengukuran dan aplikasi di Bilik Kuliah E3	93
4.30	Graf nilai perbezaan masa gemaan melawan frekuensi antara kaedah pengukuran dan aplikasi di Bilik Kuliah FPT7	93
4.31	Graf nilai perbezaan masa gemaan melawan frekuensi antara pengukuran dan aplikasi di Bilik D1 (kosong)	94
4.32	Graf nilai perbezaan masa gemaan melawan frekuensi antara kaedah pengukuran dan aplikasi di Bilik D1 (langsir)	95
4.33	Graf nilai perbezaan masa gemaan melawan frekuensi antara kaedah pengukuran dan aplikasi di Bilik D1 (bekas telur)	95

4.34	Graf kecakapan perisian kajian dan SAE untuk menjangkakan masa gemaan	96
------	---	----

SENARAI JADUAL

3.1	Spesifikasi peralatan dan perisian yang digunakan untuk mengukur keadaan akustik di dalam bilik kajian	51
4.1	Kadar masa gema yang diperolehi melalui pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah 21	57
4.2	Kadar perbezaan masa gema rumus dan pengukuran di Bilik Kuliah 21	57
4.3	Kadar masa gema yang diperolehi melalui pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah E15-3	59
4.4	Kadar perbezaan masa gema rumus dan pengukuran di Bilik Kuliah E15-3	59
4.5	Kadar masa gema yang diperolehi melalui pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah B2	60
4.6	Kadar perbezaan masa gema rumus dan pengukuran di Bilik Kuliah B2	61
4.7	Kadar masa gema yang diperolehi melalui pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah E3	62
4.8	Kadar perbezaan masa gema rumus dan pengukuran di Bilik Kuliah E3	62

4.9	Kadar masa gemaan yang diperolehi melalui pengukuran dan pengiraan di Bilik Kuliah FPT7	64
4.10	Kadar perbezaan masa gemaan rumus dan pengukuran di Bilik Kuliah FPT7	64
4.11	Kadar masa gemaan yang diperolehi melalui pengukuran dan pengiraan di Bilik Pensyarah D1(kosong)	66
4.12	Kadar perbezaan masa gemaan rumus dan pengukuran di Bilik Pensyarah D1 (kosong)	66
4.13	Kadar masa gemaan yang diperolehi melalui pengukuran dan pengiraan di Bilik Pensyarah D1(langsir)	67
4.14	Kadar perbezaan masa gemaan rumus dan pengukuran di Bilik Pensyarah D1 (langsir)	67
4.15	Kadar masa gemaan yang diperolehi melalui pengukuran dan pengiraan di Bilik Pensyarah D1 (bekas telur)	69
4.16	Kadar perbezaan masa gemaan rumus dan pengukuran di Bilik Pensyarah D1 (bekas telur)	69
4.17	Kadar pekali serapan yang diperolehi melalui kaedah kajian menggunakan parameter Bilik Kuliah 21	78
4.18	Kadar pekali serapan yang diperolehi melalui kaedah kajian menggunakan parameter Bilik Kuliah 15-3	80
4.19	Kadar pekali serapan yang diperolehi melalui kaedah kajian menggunakan parameter Bilik Kuliah B2	81
4.20	Kadar pekali serapan yang diperolehi melalui kaedah kajian menggunakan parameter Bilik Kuliah E3	82

4.21	Kadar pekali serapan yang diperolehi melalui kaedah kajian menggunakan parameter Bilik Kuliah FPT7	83
4.22	Kadar pekali serapan yang diperolehi melalui kaedah kajian menggunakan parameter Bilik D1 (kosong)	85
4.23	Kadar pekali serapan yang diperolehi melalui kaedah kajian menggunakan parameter Bilik Bilik D1 (langsir)	87
4.24	Kadar pekali serapan yang diperolehi melalui kaedah kajian menggunakan parameter Bilik D1 (bekas telur)	88

BAB 1

PENGENALAN

Berdasarkan ‘*The American Heritage Dictionary of the English Language*’ (2000), bunyi membawa maksud gelombang mekanikal iaitu tekanan yang bergerak menerusi pepejal, cecair dan gas. Ia terdiri dari frekuensi dalam julat pendengaran iaitu tahap di mana ia cukup kuat untuk didengar dan dapat merangsang organ-organ pendengaran disebabkan getaran udara yang terhasil. Daripada penjelasan di atas, bunyi yang terhasil adalah dipengaruhi oleh medium-medium dan keadaan sekeliling.

Merujuk kajian yang dilakukan oleh Bohn (1988), menyatakan keadaan persekitaran memberi kesan perubahan terhadap halaju dan penyerapan bunyi ke udara. Walaupun dengan peratusan yang kecil ia dapat memberi kesan yang besar kepada pendengar terutamanya di kawasan tertutup atau bilik. Jika di kawasan yang tertutup, bunyi yang dihasilkan akan diserap dan dipantul oleh bahan atau peralatan yang ada di sekelilingnya. Kenyataan ini disokong oleh hasil kajian Arenas dan Crocker (2010) menyatakan bahan penyerap bunyi dapat mengurangkan paras tekanan gemaan terutama di dalam kawasan tertutup atau bilik.

Bilik yang dijadikan tempat belajar atau tempat perbincangan haruslah mempunyai ciri-ciri akustik yang baik terutama dari aspek masa gemaan supaya aktiviti perbincangan dan pembelajaran tidak terganggu. Masa gemaan terhasil apabila bunyi di dalam bilik berterusan terpantul di dalam tempoh tertentu selepas punca bunyi dihentikan. Webb dan Bines (1991) menyatakan masa gemaan bermaksud masa yang diambil oleh bunyi untuk berkurang dalam kadar 60dB dari keamatan asalnya.

Masa gemaan boleh diperolehi dengan pengukuran menggunakan kaedah ISO 3382-1 (2009). Kaedah ini memerlukan peralatan seperti sumber bunyi *omnidirectional*, mikrofon dan komputer untuk mengumpul dan menganalisis data. Kaedah ini memberikan data yang tepat, tetapi ia hanya boleh dilakukan dengan kepakaran dan memerlukan masa yang lebih untuk pengukuran. Bagi mengatasi masalah ini, terdapat banyak kaedah dihasilkan untuk menjangkakan masa gemaan seperti *Finite Element Method*, *Boundary Element Method* dan *Ray-Tracing*. Tetapi kebanyakan memerlukan penggunaan komputer yang kompleks. Disamping itu terdapat kaedah teori yang sering digunakan untuk menjangkakan masa gemaan seperti rumus Sabine, rumus Eyring dan rumus Millington-Sette. Passero dan Zannin (2010) menyatakan walaupun kaedah menggunakan komputer menghasilkan jangkaan yang lebih tepat dibandingkan dengan kaedah teori, kaedah teori adalah lebih mudah dan hasil jangkaannya masih boleh diterima.

Kajian yang dilakukan menumpukan pada penghasilan bunyi di dalam bilik kosong. Ia menitikberatkan perkara seperti bentuk fizikal bilik iaitu isipadu bilik, bahan utama yang digunakan untuk membina bilik dan bahan penyerap bunyi yang dipasang di bilik yang dikaji. Rumus Sabine digunakan di dalam kajian ini dan dikaji kecekapannya untuk menjangkakan masa gemaan. Sebuah aplikasi kajian akan dibina dengan menggunakan rumus Sabine dengan bantuan perisian MATLAB bertujuan untuk menjangkakan masa gemaan dan pekali serapan bahan yang wujud di dalam bilik.

Masa gemaan dan pekali serapan dipilih kerana ia menjadi tunjang utama kajian bunyi di dalam bilik. Ini berdasarkan kajian-kajian terdahulu yang banyak menggunakan parameter masa gemaan dan pekali serapan di dalam kajian yang dijalankan. Sebagai contohnya kajian yang dijalankan oleh Bistafa dan Bradley (2000) iaitu mengkaji masa gemaan menggunakan kaedah simulasi kelas. Kajian mereka adalah membandingkan keputusan dari kaedah eksperimen terhadap simulasi bilik dengan kaedah pengiraan komputer. Dalam kajian tersebut parameter masa gemaan dan pekali serapan digunakan.

1.1 Pernyataan masalah

Analisis terhadap bunyi begitu penting terhadap bilik yang dibina untuk tujuan tertentu. Sebagai contoh dewan, bilik kuliah, studio rakaman, pusat muzik, perpustakaan dan lain-lain. Analisis terhadap bunyi perlu dilakukan untuk memperolehi ciri-ciri bunyi yang dikehendaki. Jika tidak, tujuan pembinaan bilik tersebut tidak tercapai. Jurutera bunyi perlu menganalisis keadaan akustik di dalam bilik. Daripada analisis yang dibuat, jurutera akan menentukan reka bentuk bilik, jenis penyerap bunyi yang sesuai dan bahan yang perlu digunakan untuk membina bilik tersebut.

Analisis bunyi di dalam bilik memerlukan tempoh masa yang lama untuk dilakukan. Ini kerana data yang banyak diperlukan untuk merealisasikan analisis ini. Sebagai contoh Diaz dan Pedro (2004) menyatakan bahawa semakin isipadu bilik meningkat semakin tinggi kadar masa gema yang dihasilkan di dalam bilik. Keadaan bilik yang berlainan dari satu sama lain dari segi saiz menyebabkan hasil kiraan tidak boleh diguna pakai untuk analisis bilik yang berbeza. Tambahan pula pada masa kini bilik dilengkapi dengan penyerap bunyi yang diperbuat dari pelbagai-bagai jenis bahan. Cavanaugh dan Wilkes (1999), menyatakan reka bentuk bangunan, pelan bangunan dan pemilihan bahan binaan mempengaruhi keadaan akustik sekitar bangunan. Ini menyebabkan nilai serapan berbeza dan menyukarkan pengiraan.

Sebagai jalan penyelesaian, sebuah aplikasi menggunakan komputer dibina untuk memudahkan kerja-kerja analisis di dalam bilik. Semua rumus dikumpulkan di dalam aplikasi kajian ini supaya ia menjadi alat pengiraan untuk kerja-kerja menganalisis bunyi. Selain itu pembolehubah-pembolehubah tetap seperti nilai serapan bahan turut dikumpulkan di dalam kaedah kajian supaya pengguna hanya perlu memilih bahan yang harus digunakan bagi mewakili keadaan bilik tersebut. Bagi pembolehubah yang tidak tetap sebagai contohnya isipadu bilik, pengguna hanya perlu memasukkan nilai isipadu bilik di ruang yang disediakan. Pengiraan dapat dilakukan dengan pantas dan berkesan.

Kajian ini adalah bertujuan mengkaji kemampuan rumus Sabine untuk digunakan di dalam aplikasi untuk menjangkakan masa gema dan pekali serapan bahan.

1.2 Matlamat kajian

Matlamat utama kajian adalah untuk membina kaedah yang dapat membantu dalam kerja menganalisis ciri-ciri akustik di dalam bilik. Ciri-ciri akustik yang akan dijangkakan hanya untuk kawasan yang tertutup atau di dalam bilik. Selain itu kaedah kajian ini mengutamakan ciri-ciri mesra pengguna dan tidak terlalu rumit untuk digunakan, malah pengguna yang tidak mahir dalam bidang akustik turut boleh menggunakannya.

Ciri-ciri mesra pengguna ini akan memudahkan kerja jangkaan ciri-ciri akustik tanpa perlu memasukkan data yang sukar difahami. Kewujudan kaedah kajian ini juga dapat menjimatkan masa berbanding menggunakan cara jangkaan yang lain.

1.3 Objektif kajian

Mewujudkan satu kaedah atau aplikasi menggunakan komputer yang boleh memberi maklumat ciri-ciri akustik di dalam bilik tertutup.

1.4 Skop kajian

Bagi mencapai objektif penyelidikan, skop kajian adalah:-

- i. Menganalisis bilik-bilik yang digunakan sebagai bilik kajian dari segi saiz dan bentuk fizikal.
- ii. Melakukan pengukuran menggunakan kaedah piawaian ISO 3382-1 (2009) di bilik kajian.
- iii. Membangunkan aplikasi kajian yang dapat menjangkakan ciri-ciri akustik seperti masa gemaan dan pekali serapan.

- iv. Membandingkan keputusan jangkaan masa gemaan dan pekali serapan yang diperolehi dari kaedah kajian dengan kaedah pengukuran di bilik kajian.

1.5 Hasil kajian

Pada akhir kajian ini, sebuah kaedah untuk menganalisis bunyi di dalam bilik dibina. Ia memudahkan pengguna dengan ciri-ciri yang terdapat padanya, seperti penyediaan data-data seperti senarai bahan binaan bilik berserta nilai pekali serapan disediakan supaya pengguna mudah memilih bahan ketika melakukan analisis. Bahan jangkaan turut disenaraikan berdasarkan kadar serapan yang dijanakan oleh perisian. Data-data bahan ini bukan sahaja disenaraikan berserta pekali serapan tetapi keterangan ringkas berserta gambar turut disediakan. Ini untuk memudahkan pengguna memilih bahan yang sesuai ketika menggunakan kaedah kajian ini.

Hasil dari penyelidikan ini diharap dapat memudahkan kerja-kerja analisis bunyi oleh jurutera binaan, kontraktor, arkitek, mahupun pereka dalaman bilik. Kini dengan adanya aplikasi kajian ini, kerja akan menjadi lebih mudah dan dapat menjimatkan kos serta masa.

BAB 2

KAJIAN LITERATUR

2.1 Pengenalan

Kebanyakan aktiviti yang melibatkan bunyi seperti perbincangan, syarahan, pembelajaran mahupun rakaman suara dilakukan di dalam bilik. Faktor ini memerlukan keadaan akustik bilik yang baik. Ini memerlukan kajian dan analisis supaya ciri-ciri bilik yang sesuai diperolehi mengikut kegunaan sesuatu bilik.

Bilik didefinisikan sebagai ruang yang disempadani oleh dinding, tingkap, lantai dan siling. Ia boleh dikategorikan sebagai ruang tertutup. Faktor ini menyebabkan ciri-ciri akustik bilik berbeza dari ruang terbuka. Ini disebabkan oleh tindak balas pantulan dari permukaan di dalam bilik. Seperti dinyatakan oleh Bies dan Hansen (2003) apabila punca bunyi diaktifkan, bunyi yang dihasilkan di dalam ruang tertutup adalah berbeza dari bunyi yang dihasilkan di luar ruang terbuka. Ini kerana ia dipengaruhi oleh sifat pantulan bahan dan bentuk ruang tertutup tersebut. Jika ruang tertutup ini dikelilingi dengan permukaan yang bersifat pantulan, pantulan bunyi berganda akan terhasil.

Pantulan bunyi terhasil adalah disebabkan bunyi yang bergerak melanggar sempadan bilik. Rossing *et al.* (2002) menyatakan di dalam bilik, bunyi bergerak hanya dalam jarak yang kecil sebelum ia melanggar dinding dan permukaan lain. Hasil dari pelanggaran permukaan di dalam bilik menyebabkan pantulan atau penyerapan bunyi yang mengakibatkan perubahan ciri-ciri bunyi. Seperti dikatakan oleh Cavanaugh dan Wilkes (1999), apabila bunyi melanggar satu permukaan, ia

dipindahkan, terpantul dan ada yang terserap. Selalunya ketiga-tiga perkara ini terjadi. Peratus untuk tenaga berpindah adalah begitu kecil, selalunya dibawah kadar 1% yang mana ia menghasilkan kehilangan pemindahan bunyi sebanyak 20dB. Sebahagian tenaga terpantul dan sebahagiannya terserap. Disebabkan fenomena ini, bunyi yang didengar adalah berbeza dari bunyi yang dihasilkan.

Bunyi yang dihasilkan di dalam bilik selalunya menghasilkan pengulangan bunyi. Perkara ini telah dijelaskan oleh Everest dan Pohlmann (2009), tekanan bunyi yang didengar tidak secara terus ke nilai akhir kerana faktor perjalanan bunyi yang mempunyai jarak yang berbeza. Perkara ini terjadi akibat dari komponen pantulan bunyi dari dinding bilik yang jaraknya lebih jauh dari komponen bunyi yang bergerak secara terus kepada pendengar. Disebabkan perkara ini, pengulangan bunyi dapat didengar. Pengulangan bunyi ini dikenali sebagai gema.

2.2 Peranan frekuensi dalam akustik bilik

Frekuensi bunyi adalah perkara yang penting di dalam pengukuran bunyi di dalam bilik. Nilai-nilai frekuensi turut mempengaruhi keadaan sesuatu ciri-ciri akustik. Ini ditunjukkan dari kajian Mikulski dan Radosz (2011) yang mendapati hubungan indeks pemindahan percakapan dengan masa gema adalah lebih baik menggunakan frekuensi purata pada kadar nilai 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz dan 4000Hz dari nilai frekuensi purata 500Hz, 1000Hz dan 2000Hz untuk mengira masa gema. Selain itu frekuensi mempengaruhi kecekapan pendengaran. Berdasarkan Honarvar *et al.* (2010), frekuensi kadar normal aktiviti pendengaran iaitu antara 500Hz hingga 5000Hz. Frekuensi yang sering digunakan di dalam bilik berdasarkan penulisan Sant'Ana dan Zannin (2010) adalah di dalam band oktev 125Hz hingga 4000Hz.

Keputusan frekuensi dinyatakan oleh Rhiana *et al.* (2011) bahawa karakter akustik di dalam bilik adalah bergantung pada frekuensi dan kedudukan penerima bunyi. Berdasarkan Rossing *et al.* (2002), menyatakan kadar serapan bunyi sesuatu bahan adalah berkait dengan frekuensi bunyi yang dikenakan. Sifat bahan seperti keras, lembut, berliang atau mempunyai ruang sel terbuka boleh mengubah sesuatu pengukuran bunyi bergantung pada frekuensi bunyi yang dikenakan. Bahan yang keras menyerap bunyi dalam kadar yang tinggi pada frekuensi rendah manakala

bahan berliang lebih menyerap bunyi pada frekuensi tinggi. Bahan yang mempunyai sel terbuka lebih menyerap bunyi pada frekuensi tinggi. Selain bertindak balas bersama sifat bahan frekuensi, ia turut mempengaruhi kadar kestabilan graf penurunan bunyi.

Kenyataan kadar serapan mahupun masa gemaan bergantung kepada frekuensi bunyi yang dikenakan turut dinyatakan oleh Cavanaugh dan Wilkes (1999). Beliau menerangkan bahawa bunyi yang wujud di dalam bilik, termasuk keadaan akustik yang dihasilkan oleh sesuatu alat dan bahan yang digunakan sebagai pengawal bunyi adalah bergantung pada frekuensi. Pengaruh frekuensi adalah begitu penting untuk menilai aras bunyi atau menilai sesuatu produk yang mengeluarkan bunyi. Tambah beliau, kadar pekali penyerap bunyi untuk setiap bahan berkait dengan frekuensi. Diaz dan Monaragala (2007) turut membuktikan bahawa frekuensi mempengaruhi akustik bilik apabila dari kajian yang dilakukan menunjukkan penyerapan bunyi oleh fabrik ruang berkedut adalah cekap pada frekuensi 2000Hz dan keatas apabila kadar pekali serapan bunyi adalah tinggi dari 50%. Cavanaugh dan Wilkes (1999) turut menyatakan bahawa serapan bergantung kepada frekuensi. Penyerap bunyi berliang lebih cekap apabila pada kadar frekuensi tinggi. Tetapi kecekapannya boleh ditingkatkan pada frekuensi rendah jika ditambahkan ketebalan dan ruang udara.

Frekuensi terbahagi kepada aras rendah, sederhana dan tinggi. Sebagai contoh dalam kajian Jean dan Marie (2007) menyatakan frekuensi rendah adalah di kalangan 50Hz ke 600Hz. Menurut Everest dan Pohlmann (2009) pada frekuensi rendah bacaan pengukuran kurang baik dan boleh mengakibatkan penghasilan graf penurunan aras bunyi yang mempunyai ralat. Tetapi semakin meningkat frekuensi semakin sempurna graf penurunan aras bunyi dihasilkan. Penurunan aras bunyi berkeadaan semakin stabil apabila frekuensi semakin meningkat. Ketika melakukan pengiraan gemaan bahan, kesemua frekuensi rendah, sederhana dan tinggi perlu diambil kira. Jika keadaan bilik kurang kritikal frekuensi sederhana iaitu 1000Hz haruslah digunakan. Rossing *et al.* (2002) turut menyatakan penggunaan nilai masa gemaan pada pertengahan frekuensi iaitu 500Hz ke 2000Hz memberi gambaran yang adil untuk keadaan '*Liveness*' untuk auditorium atau dewan konsert.

2.3 Bahan serapan bunyi

Bahan serapan bunyi digunakan untuk mengurangkan aras bunyi di sesuatu kawasan. Ia digunakan untuk memerangkap tenaga bunyi. Barron (2003) menyatakan permukaan penyerap digunakan untuk mengurangkan aras bunyi atau mengurangkan gema. Ia tidak merubah bunyi yang datang secara terus dari punca ke penerima. Tetapi ia bertindak balas pada bunyi yang melanggarnya. Arenas dan Crocker (2010) pula menyatakan bahan penyerap bunyi menyerap kebanyakan tenaga bunyi yang melanggar bahan tersebut dan memantulkannya pada kadar yang kecil. Seperti dikatakan oleh Egan (1988) apabila bunyi berlanggar dengan sempadan permukaan bilik, sebahagian dari tenaga diserap atau berpindah dan sebahagiannya terpantul semula ke dalam bilik. Aras bunyi di dalam bilik boleh dikurangkan dengan penggunaan bahan penyerap bunyi yang sesuai.

Pemilihan bahan begitu penting di dalam aktiviti menentukan akustik bilik. Seperti dinyatakan oleh Aretz dan Orłowski (2009), dengan mengaplikasikan pelbagai bahan akustik seperti tirai akustik dan panel penyerap dapat mengawal kekuatan bunyi dan masa gema dalam kadar yang besar. Meissner (2007) menyatakan perkara yang sama dalam penulisannya iaitu kepelbagaian lokasi bahan boleh memberi kesan pergantungan masa gema terhadap frekuensi punca bunyi. Bahan-bahan ini dapat menentukan kegunaan sesuatu bilik tersebut samaada sebagai tempat rakaman suara, kawasan berucap mahupun ruang bacaan.

Bahan terbahagi kepada bersifat keras dan berliang secara umumnya. Bahan bersifat berliang mempunyai kadar serapan bunyi yang tinggi. Ini kerana apabila tenaga bunyi melanggar permukaan berliang ia menyebabkan tenaga bunyi bertukar kepada tenaga haba akibat dari getaran yang disebabkan oleh pelanggaran partikel-partikel halus bahan berliang. Ini menyebabkan tenaga bunyi berkurangan. Kejadian ini terjadi seperti dinyatakan oleh Lewis dan Douglas (1994), penyerapan tenaga akustik terhadap bahan berliang dan berbulu adalah disebabkan perubahan dari tenaga aerodinamik dan termodinamik. Terdapat adiabatik pemindahan haba isothermal disebabkan pengembangan gas dan pengurangan ketumpatan sepanjang sisi liang dan di ruang itu sendiri. Pada waktu tenaga akustik berpindah ke haba di dalam bahan tersebut, kadar serapan juga berubah berdasarkan jenis permukaan bahan penyerap yang digunakan. Perkara ini diterangkan oleh Cavanaugh dan Wilkes (1999) yang menyatakan ia terjadi kerana serapan melalui geseran hadir bila bunyi

memasuki sesuatu liang atau celahan di dalam satu bahan berliang. Molekul udara terhalang dari meneruskan kitaran mampatan. Tenaga bunyi berkurang berubah ke tenaga haba. Seddeq (2009) turut menyatakan ruang udara meningkatkan pekali serapan bunyi pada nilai frekuensi kadar sederhana dan tinggi.

Sifat bahan dapat mempengaruhi ciri-ciri akustik bilik. Everest dan Pohlmann (2009) menyatakan bahawa bahan yang keras mempunyai sifat yang memantulkan bunyi. Bahan yang mempunyai ruang terbuka pula mengurangkan tenaga bunyi dengan proses pantulan dengan permulaannya memerangkap tenaga bunyi dan memantulkan ke sudut lain di dalam sel yang sama. Selain itu ketebalan bahan turut memainkan peranan penting dalam mempengaruhi kecekapan serapan bunyi. Semakin tebal bahan semakin baik bahan serapan bunyi tersebut. Perkara ini turut terbukti dalam kajian Hong-Ru *et al.* (2011) iaitu pembinaan penyerap bunyi yang ketebalannya boleh diubah membuktikan ketebalan bahan mempengaruhi kadar serapan bunyi. Bahan seperti kaca turut mempengaruhi karekter bunyi berdasarkan Everest (1997) menyatakan, bunyi yang melanggar kepingan kaca akan menghasilkan getaran pada kepingan kaca dan menyebabkan udara disekelilingnya beralun terutama apabila terdapat susunan kaca berganda. Fenomena ini dikenali sebagai jisim-udara-jisim. Udara di antara ruang kaca bertindak seperti spring yang jisimnya berpindah ke hujung spring. Ini menyebabkan perubahan kepada aras tekanan bunyi.

Langsir adalah bahan penyerap bunyi yang sering digunakan di dalam bilik. Penggunaan langsir dapat menukar ciri-ciri akustik sesuatu bilik. Seperti dikatakan oleh Everest dan Pohlmann (2009), langsir boleh dikatakan sebagai bahan berliang. Selain dari berliang, cara mengantungkan langsir turut dapat mempengaruhi ciri-ciri akustik sesuatu bilik. Ini disebabkan ketika gelombang bunyi menghampiri dinding, tekanan meningkat tetapi kelajuan zarah udara akan menjadi sifar kerana gelombang bunyi menghampiri dinding. Apabila berada pada kadar $1/4$ jarak gelombang dari dinding, tekanan menjadi sifar dan kelajuan zarah udara menjadi maksimum. Jika ditempatkan langsir pada jarak $1/4$ gelombang dari pada dinding, nilai kadar serapan bunyi akan berada pada paras paling maksimum pada sesuatu frekuensi kerana kelajuan zarah adalah pada kadar tertinggi pada bahan berliang dan mengakibatkan kehilangan akibat geseran. Peratus lipatan langsir turut mempengaruhi kecekapan penyerapan bunyi.

Pelbagai lagi faktor yang dapat mempengaruhi ciri-ciri akustik bilik. Seperti dinyatakan oleh Kuttruff (1991) bahawa jenis bahan yang dipilih, frekuensi bunyi yang dikenakan, keadaan fizikal sesuatu medium mempengaruhi kadar serapan di dinding serta kadar pemindahan bunyi.

2.3.1 Pekali serapan

Menurut Webb dan Bines (1991), tenaga bunyi yang diserap digambarkan dalam bentuk nisbah tenaga bunyi kepada tenaga *incident* dan ia disebut sebagai pekali serapan bunyi. Pengukuran yang sering digunakan untuk mengukur kadar serapan adalah pekali serapan. Pekali serapan adalah nilai serapan yang diwakili oleh kadar 1 hingga 0. Jika sesuatu bahan yang langsung tidak menyerap bunyi, pekali serapannya adalah bernilai 0, atau dalam erti kata lain sesuatu bahan yang mempunyai pekali serapan 0 memantulkan bunyi asal secara keseluruhan. Han *et al.* (2007) turut menyatakan bahawa pekali serapan akustik adalah diantara nilai 0 hingga 1.

Pekali serapan boleh dikatakan sebagai parameter pengukur kecekapan penyerapan bahan. Seperti dikatakan oleh Everest dan Pohlmann (2009) yang menyatakan pekali serapan adalah kaedah pengukuran kecekapan permukaan atau bahan dalam menyerap bunyi. Jika 55% tenaga bunyi diserap pada sesuatu frekuensi, pekali serapan yang mewakilinya adalah 0.55. Sesuatu penyerap yang menyerap 100% bunyi, nilai pekali serapannya adalah 1. Bagi permukaan pemantul yang baik nilai pekali serapannya adalah 0.

Menurut Cavanaugh dan Wilkes (1999), penyerap bunyi paling efektif diperolehi jika pekali serapan bunyi melebihi kadar 0.4 (40% serapan dan 60% dipantulkan). Sementara bahan yang mempunyai pekali serapan 0.8 atau lebih (80% diserap dan 20% terpantul) adalah diterima sebagai penyerap yang sangat cekap. Serapan tenaga ini menyebabkan gema semakin berkurang.

Berdasarkan kenyataan Egan (1988) bahan yang mempunyai pekali serapan paras sederhana dan tinggi berada dalam lingkungan 0.5 keatas adalah dirujuk sebagai penyerap bunyi yang baik, manakala pekali rendah selalunya 0.2 kebawah adalah pemantul bunyi yang baik. Nilai pekali serapan 0.1 kebawah dikelaskan di

dalam kadar serapan kecil. Nilai 0.1 ke 0.4 dihanggap kadar serapan sederhana manakala nilai pekali serapan 0.4 keatas dihanggap kadar serapan tinggi.

2.4 Gemaan

Gemaan terjadi akibat dari gelombang bunyi yang dihasilkan terpantul akibat melanggar sesuatu permukaan yang keras. Menurut Lewis dan Douglas (1994) bunyi yang dihasilkan oleh sumber bunyi bergerak secara terus kepada pendengar. Sebahagian dari bunyi pula bergerak secara lurus lalu melanggar permukaan dan menghasilkan bunyi pantulan dari dinding, lantai, siling dan permukaan lain. Menurut mereka lagi bunyi pantulan ini hadir selepas bunyi asal didengar. Ia akibat dari jarak yang dilaluinya. Bunyi secara terus bergerak secara lurus kepada pendengar, tetapi bunyi pantulan melalui jarak yang lebih panjang bermula dari sumber bunyi kemudian jaraknya bertambah setelah ia dipantulkan dan bergerak kepada pendengar. Akibat dari sumber pantulan berganda, bunyi yang didengari berkeadaan gema.

Gemaan yang terjadi di dalam bilik berpunca dari bunyi yang dihasilkan oleh percakapan atau sumber bunyi yang lain. Ia boleh mengganggu pendengaran penghuni. Ini dibuktikan dengan kajian yang dijalankan oleh Shabtai *et al.* (2010) yang menunjukkan pengaruh masa gemaan adalah lebih tinggi dari pengaruh isipadu bilik. Ini menunjukkan pendengaran boleh terganggu akibat dari gemaan. Dari penulisan Abouchacra *et al.* (2011) pula menyatakan perbezaan medan gemaan bunyi akan bertindak terhadap pengenalan percakapan bila dua atau lebih percakapan dipertuturkan. Perkara ini membuktikan gemaan boleh mengganggu perbincangan.

Gemaan di dalam bilik boleh diukur dan dinilai. Menurut Rossing *et al.* (2002), nilai kadar gemaan boleh dianggarkan dengan mengambil kira faktor tenaga bunyi. Punca bunyi menghasilkan tenaga, yang mana kemudian ia disimpan di dalam ruang udara. Setelah itu ia diserap oleh dinding, siling dan objek di sekelilingnya. Aras gemaan boleh diperoleh bila tenaga yang dibekalkan oleh punca berada pada paras sama aras bunyi diserap. Selain itu kaedah pengukuran tempoh masa gemaan dapat menganggarkan masa gemaan di dalam bilik.

2.4.1 Masa gemaan

Bunyi gemaan terjadi tidak secara berterusan. Terdapat tempoh masa untuk bunyi gemaan ini wujud sebelum ia terhapus. Tempoh ini dipanggil masa gemaan. Menurut Webb dan Bines (1991), apabila sumber bunyi dihentikan bunyi yang didengar tidak berhenti secara mendadak, tetapi terdapat tempoh masa untuk ia dipantulkan kepada setiap permukaan. Akibat dari proses pantulan ini menyebabkan terdapat kehadiran bunyi selepas sumber dihentikan. Tempoh masa ini yang boleh diukur, dikira atau dianggarkan. Mereka turut berkata bahawa masa gemaan ini adalah salah satu faktor yang dapat digunakan untuk menentukan kualiti dan membuat perbandingan keadaan akustik di dalam ruang berbeza. Barron (2003) turut menyatakan apabila sumber bunyi di dalam bilik dihentikan secara tiba-tiba, terdapat tempoh masa diperlukan oleh tenaga bunyi untuk secara keseluruhannya diserap oleh permukaan bilik. Ternyata apabila tenaga bunyi diserap dan bertukar kepada tenaga haba, masa gemaan terhenti.

Everest dan Pohlmann (2009) menyatakan, masa gemaan diukur dengan kadar pengurangan bunyi. Ia didefinisi sebagai masa di dalam saat yang diperlukan oleh keamatan bunyi di dalam bilik untuk berkurang sebanyak 60dB dari nilai aras asal. Ini ditunjukkan dari perubahan keamatan bunyi atau kuasa bunyi untuk 1 juta watts ($10\log 1000000=60\text{dB}$). Pengukuran masa gemaan adalah merujuk pada RT60. RT60 berdasarkan Cavanaugh dan Wilkes (1999) adalah masa gemaan di dalam bilik yang dijangkakan dengan menggunakan persamaan Sabine. Selalunya bilik yang kurang bahan serapan mempunyai kadar gemaan yang tinggi.

Seperti yang dinyatakan oleh Webb dan Bines (1991), masa gemaan dapat menentukan kualiti akustik dalam ruang berbeza. Perkara ini turut disokong dengan kenyataan Rossing *et al.* (2002) bahawa auditorium yang bersesuaian untuk aktiviti percakapan seharusnya mempunyai masa gemaan yang kecil. Manakala untuk muzik, nilai masa gemaan yang tinggi diperlukan. Ini menunjukkan masa gemaan dapat menentukan kesesuaian sesuatu tempat untuk tujuan khas. Perkara ini turut disokong oleh Vallet dan Karabiber (2002) apabila dalam kajian mereka menyatakan nilai 0.4s-0.7s pada frekuensi 500Hz ke 4000Hz sesuai sebagai masa gemaan bangunan sekolah.

2.4.2 Peranan fizikal bilik terhadap gema

Menurut Cavanaugh dan Wilkes (1999), keadaan akustik di sekitar bangunan dipengaruhi oleh rekabentuk bangunan, pelan bangunan dan cara pemilihan bahan pembinaan bangunan itu sendiri. Pemilihan kawasan tapak serta lokasi dan susun atur ruang mempengaruhi penambahan masalah akustik yang sedia ada.

Saiz turut mempengaruhi kadar gema sesuatu bilik. Seperti dinyatakan oleh Diaz dan Pedro (2004), semakin isipadu bilik meningkat semakin tinggi kadar gema yang dihasilkan di dalam bilik. Ini dibuktikan oleh kajian Yoo (2001) terhadap sebuah bangunan gimnasium yang menunjukkan ruang yang luas ditambah dengan permukaan yang keras menyebabkan kadar gema yang tinggi terjadi. Kajian Coley (2002) turut membuktikan saiz mempengaruhi gema kerana dalam kajiannya menunjukkan purata pekali serapan pada dinding perlu ditingkatkan dua kali lebih tinggi dari purata pekali serapan bilik asal jika penambahan tinggi ruang berbentuk kuboid berlaku. Saiz turut dibuktikan mempengaruhi masa gema berdasarkan Peer *et al.* (2008) apabila mendapati sistem perhubungan melalui percakapan di dalam ruang tertutup seperti pejabat akan mewujudkan gema percakapan jika jarak antara pembesar suara dan mikrofon terlalu besar.

Rupa bentuk bilik seperti bucu-bucu binaan boleh meningkatkan ralat dalam pengukuran bunyi di dalam bilik. Ini dibuktikan dari penulisan Hovat *et al.* (2008) menyatakan bahawa bilik yang tidak mempunyai bentuk seragam dan bilik yang bersaiz kecil haruslah diberi perhatian yang lebih dari segi pemilihan cara pengukuran dan sumber bunyi. Seperti dinyatakan oleh Kuttruff (1991), bunyi tidak tiba kepada penerima bunyi secara terus dari punca bunyi tetapi sebahagiannya diterima dari hasil pantulan bunyi dari permukaan keras bilik. Bunyi pantulan dari pelbagai arah ini mempunyai kadar tenaga yang berbeza dan kehadirannya tertangguh akibat dari jarak perjalanan gelombang bunyi yang bertambah. Jika binaan bilik bersudut dan berbucu, ia meningkatkan lagi kadar gema.

Keadaan fizikal permukaan bilik turut mempengaruhi ciri-ciri akustik bilik. Cavanaugh dan Wilkes (1999) menyatakan, jika permukaan bilik secara asasnya keras dan memantulkan bunyi, ia akan menyebabkan kehilangan kecil aras bunyi setiap kali gelombang bunyi melanggar permukaan bilik. Beliau turut menyatakan bahawa jika gelombang bunyi melanggar satu permukaan, terdapat tiga perkara yang akan terjadi iaitu bunyi dipindahkan, dipantulkan dan diserap. Peratus tenaga

terpindah adalah begitu kecil, iaitu secara umumnya kurang dari 1% persamaan kehilangan pemindahan sebanyak 20dB. Jika permukaan lembut dan berliang digunakan sebagai permukaan bilik, ia menyebabkan kehilangan yang tinggi setiap kali gelombang bunyi bertembung dengan permukaan bilik. Dalam kajian Wang *et al.* (2004) menyatakan bentuk bilik dan susunan kayu memberi kesan pada nilai masa gemaan penerima yang berlainan tempat. Ini dapat membuktikan keadaan fizikal permukaan bilik dapat mempengaruhi ciri-ciri akustik di dalam bilik.

Lokasi sesuatu bilik turut mempengaruhi gemaan. Lokasi yang bising meningkatkan bunyi latar belakang. Berdasarkan kajian Tang dan Yeung (2005), mendapati hubungan masa gemaan dan pemindahan pertuturan berkurang disebabkan oleh bunyi latar belakang. Egan (1988) menyatakan bunyi latar belakang dapat mengganggu pengukuran karakter bunyi di dalam bilik berdasarkan teori spektrum bunyi latar belakang, setiap spektrum bunyi mempunyai kaitan dengan frekuensi. *White noise* adalah salah satu dari spektrum bunyi yang mempunyai ciri apabila frekuensi bertambah aras bunyi turut bertambah. Spektrum *masking noise* pula mengalami kejatuhan 3 dB ke 6 dB per oktev di frekuensi sederhana dan tinggi. Manakala *low background noise* pula akan berkurang aras bunyi apabila frekuensi bertambah. Daripada kenyataan di atas diketahui jika bunyi latar belakang terlalu tinggi, pengukuran akan terganggu dan mengakibatkan pertukaran dari segi aras bunyi akibat gangguan frekuensi bunyi luar.

2.4.3 Pengukuran masa gemaan

Kuttruff (1991) menyatakan apabila satu dewan hendak dibina adalah lebih baik jika model dewan tersebut diuji keadaan akustiknya untuk mengetahui ciri-ciri akustiknya dan mengetahui kekurangan akustik yang dihadapi. Tambahan lagi pengukuran semasa fasa-fasa pembinaan haruslah dilakukan untuk memastikan pembinaan mengikut konsep akustik yang ditetapkan. Dari kenyataan ini, jelaslah menunjukkan pentingnya pengukuran masa gemaan.

Terdapat pelbagai cara untuk mengukur masa gemaan. Diantaranya adalah mengikut piawaian ISO 3382-1 (2009). Piawaian ini selalu digunakan oleh pengkaji dalam mengukur bunyi gemaan di dalam bilik. Sebagai contohnya Pavlovic *et al.* (2006) menggunakan piawaian ini sebagai pengukuran keberkesanan punca bunyi

yang dicipta. Satu daripada cara pengukuran berdasarkan ISO 3382-1 (2009) adalah dengan cara gangguan bunyi. Cara pengukuran ini dilakukan dengan menghasilkan satu bunyi jalur lebar yang dihasilkan oleh pembesar suara. Bunyi yang dihasilkan kemudian dihentikan secara tiba-tiba untuk mendapatkan bunyi gema. Bunyi yang digunakan tidak boleh di dalam turutan berulang. Di dalam standard ISO 3382-1 (2009) terdapat juga cara mengukur menggunakan penghasilan tindak balas dedenyut. Cara pengukuran ini hampir sama dengan cara gangguan bunyi. Perbezaan yang dapat dilihat adalah dari segi penggunaan sumber bunyi. Cara ini menggunakan sumber yang mengeluarkan bunyi dedenyut seperti menggunakan tembakan pistol dan bunyi letupan belon.

Cara gangguan bunyi turut dibincangkan oleh Everest dan Pohlmann (2009) iaitu pengukuran dimulakan dengan sesuatu bilik dipenuhi dengan bunyi yang kuat dari *pink noise wide-band*, kekuatan arasnya mencukupi untuk kegunaan pelindung pendengaran untuk penghuni bilik. Apabila kebisingan dihentikan, bunyi di dalam bilik berkurang kepada tahap sepi. Mikrofon di kawasan terpilih mengumpul nilai pengurangan bunyi ini.

Semasa melakukan pengukuran terdapat beberapa perkara yang perlu dititikberatkan, termasuklah samaada bilik yang diukur berpenghuni atau kosong. Kendrick *et al.* (2012) menyatakan bahawa keadaan akustik di dalam bilik berbeza apabila bilik berkeadaan kosong atau berpenghuni dan dengan kehadiran kebisingan dari penghuni menyebabkan pengukuran lebih sukar. Selain dari segi kandungan bilik, ruang kecil atau bersudut perlu diambil kira dalam pengukuran. Ini dinyatakan oleh Hodgson dan Scherebnyj (2005) iaitu semasa pengukuran, dinding yang mempunyai ruangan kecil atau bersudut tetap diambil kira kecuali jika ianya terlalu kecil. Manakala lampu di dinding tidak diambil kira dan dianggap sebagai dinding sahaja.

Terdapat cara lain untuk mengukur masa gema. Diantaranya adalah *Finite Element Method*, *Boundry Element Method* dan *Rays Tracing Method*. Cara-cara ini telah digunakan oleh pengkaji untuk memperoleh masa gema. Sebagai contohnya Okuzono *et al.* (2012) menggunakan *Finite Element Method* dalam kajiannya iaitu pengubahsuaian peraturan integrasi ke semasa-domain di dalam simulasi bilik. Zhou dan Crocker (2010) pula menggunakan *Boundary Element Method* untuk menganalisis kehilangan pemindahan bunyi pada panel. Manakala Bot (2002) menggunakan *Ray Tracing Method* untuk membina persamaan fungsi.

Masa gema juga boleh diperolehi dengan cara menggunakan rumus. Menurut Everest dan Pohlmann (2009), pada tahun 1890, Wallace Clement Sabine seorang professor dalam bidang fizik telah membina rumus masa gema yang pertama dengan menggunakan sumber bunyi, jam randik dan telinga untuk mengukur masa dari gangguan punca bunyi ke keadaan sepi.

2.4.4 Pengiraan menggunakan rumus klasik

Sabine (1922), membuat kajian yang mendalam mengenai ciri-ciri akustik di dalam bilik. Beliau mencipta hubungan empirikal memudahkan jurutera untuk menentukan jumlah pembedaan akustik yang diperlukan untuk memperoleh ciri-ciri akustik yang dikehendaki di dalam bilik. Berikut merupakan rumus Sabine :-

$$T_{60} = \frac{0.161 \times V}{S\bar{\alpha}} \quad [1]$$

Dimana

- T_{60} adalah tempoh masa gema dalam penurunan 60dB aras bunyi.
- V adalah isipadu sesuatu bilik.
- S adalah luas permukaan bilik.
- $\bar{\alpha}$ adalah purata pekali serapan bahan.
- \ln adalah neperian logaritma.

Pada tahun 1930, Carl Eyring telah melakukan penambahbaikan ke atas formula Sabine.

Formula Eyring (1930) adalah seperti berikut:-

$$T_{60} = \frac{0.161 \times V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad [2]$$

Neubauer dan Kostek (2002) menulis bahawa Eyring telah menyatakan bahawa formula Sabine tidak dapat memperoleh jawapan yang tepat jika sesuatu bilik itu mempunyai kadar serapan bunyi yang tinggi. Menurut Passero dan Zannin (2010) rumus Sabine adalah rumus pertama yang diwujudkan untuk mengira masa gema. Rumus Sabine dan Eyring sering digunakan di dalam kajian akustik bilik. Sebagai contohnya Billon *et al.* (2007) di dalam kajian yang dilakukan iaitu menjangka masa gema di dalam bilik kadar serapan tinggi menggunakan model penyebaran yang diubahsuai, telah menggunakan rumus Sabine dan Eyring sebagai rumus yang diubahsuai. Selain itu Marsch dan Porchmann (1999) menggunakan rumus Sabine dan Eyring sebagai perbandingan model fizikal yang dibina.

Millington dan Sette (1932) kemudiannya melakukan penjelmaan rumus yang hampir menyerupai rumus Eyring. Perubahan yang dilakukan adalah pekali serapan setiap bahagian dinding adalah dipuratakan. Ini telah mewujudkan rumus Millington-Sette :-

$$T_{60} = \frac{0.161 \times V}{-\sum S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad [3]$$

Setelah ketiga-tiga rumus ini dibina, kerja-kerja pembinaan rumus terus berjalan. Banyak pengkaji secara terus menerus mewujudkan rumus akustik di dalam bilik. Tetapi pergantungan kepada rumus mungkin menimbulkan ralat seperti dikatakan oleh Bistafa dan Bradley (2000) bahawa di dalam sesuatu penilaian jangkaan masa gema, adalah diandaikan bahawa jangkaan berketepatan 10% adalah bersesuaian di dalam situasi praktikal. Tetapi tiada ungkapan analisis atau model komputer secara berterusan menjangkakan masa gema pada ketepatan ini.

2.4.5 Penggunaan rumus Sabine di dalam kaedah kajian

Rumus Sabine digunakan di dalam kaedah kajian ini sebagai rumus pengiraan untuk menjangkakan masa gema dan pekali serapan bahan. Rumus ini digunakan kerana ia sesuai digunakan di dalam bilik malah ia antara rumus yang ringkas yang dapat menjangkakan nilai masa gema dengan ralat yang minimum. Berdasarkan kajian Astolfi *et al.* (2007) kajian masa gema dengan menggunakan lapan bilik

kajian mendapati rumus Sabine menghasilkan ralat purata di bawah 10% dan secara keseluruhan berada tempat kedua terendah dalam menghasilkan ralat. Dari kajian Martellotta *et al.* (2011) menunjukkan rumus Sabine menghasilkan ralat bernilai 6% apabila dibandingkan dengan pengukuran di dalam 6 kawasan kajian berlainan.

Di dalam kajian ini, bilik-bilik kosong digunakan untuk melakukan pengukuran masa gema. Oleh itu rumus Sabine digunakan kerana ia sesuai digunakan di bilik kosong dan tanpa bahan penyerap bunyi. Ini dibuktikan dalam kajian Daheng dan Qi (2012) menyatakan bahawa rumus Sabine sesuai digunakan untuk menjangkakan masa gema di bilik kosong. Dance dan Shield (1998) turut menyatakan bahawa bilik yang kurang bahan penyerap sesuai menggunakan rumus Sabine untuk menjangkakan masa gema.

Rumus Sabine turut menghasilkan nilai pekali serapan yang mempunyai ralat kecil. Berdasarkan kajian Bistafa dan Bradley (2000) menunjukkan nilai pekali serapan dari rumus Sabine mempunyai ralat terkecil dari rumus perbandingan yang lain apabila digunakan di bilik tanpa penyerap. Di bilik yang menggunakan bahan penyerap bunyi, rumus Sabine tetap menghasilkan ralat yang rendah dan masih boleh digunapakai.

BAB 3

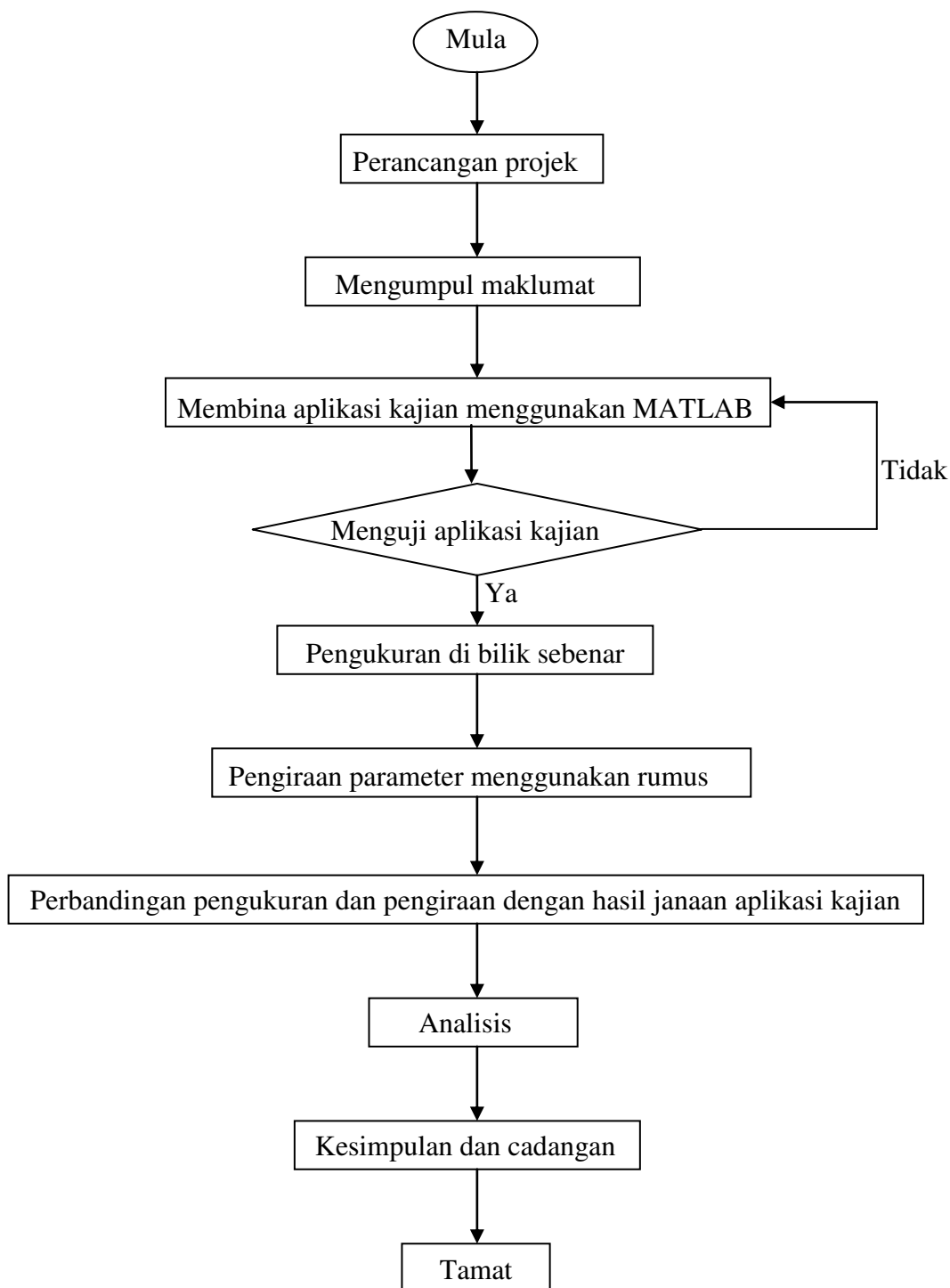
METODOLOGI

3.1 Pengenalan

Tujuan kajian adalah menghasilkan satu aplikasi yang memudahkan pengguna untuk menjangkakan masa gemaan dan penggunaan bahan yang bersesuaian sebagai bahan serapan bunyi di dalam bilik. Ciri-ciri yang diutamakan oleh aplikasi kajian ini adalah ringkas dan pantas dalam memproses data. Ia turut menyediakan data seperti kadar serapan bahan dan ia dikelaskan berdasarkan frekuensi. Aplikasi kajian ini menggunakan formula masa gemaan Sabine untuk mendapatkan masa gemaan. Manakala untuk kadar serapan pula formula Sabine ini diolah untuk menjadikan ia formula mencari kadar serapan dengan kaedah balikan rumus seperti yang diterangkan di dalam seksyen 3.4.

Aplikasi kajian yang dibina sewajarnya menjalankan proses pengesahan. Proses ini untuk membuktikan ia menghasilkan data yang tepat dan boleh digunakan. Pengesahan dilakukan dengan cara pengukuran dan pengiraan menggunakan rumus berdasarkan parameter bilik sebenar. Keputusan kedua-dua analisis dibandingkan dengan data yang dihasilkan oleh kaedah kajian. Pengukuran dilakukan menggunakan kaedah gangguan bunyi. Hasil pengukuran kemudiannya dibandingkan dengan rumus Sabine, rumus Eyring dan rumus Millington-Sette. Tujuan perbandingan ketiga-tiga formula ini untuk membuktikan formula yang paling bersesuaian untuk digunakan di bilik kosong.

3.2 Carta alir



Rajah 3.1: Carta alir perancangan projek

3.3 MATLAB untuk pembinaan kaedah kajian

MATLAB adalah perisian komputer yang dapat melakukan pengaturcaraan, visualisasi dan ia bersesuaian digunakan untuk penyelesaian masalah berangka. Seperti yang dinyatakan di dalam laman web rasmi perisian ini, MATLAB mempunyai persekitaran yang interaktif untuk pengiraan berangka, visualisasi, dan pengaturcaraan. Menggunakan MATLAB, membolehkan penganalisisan data, membangunkan algoritma, dan mewujudkan model dan aplikasi. Bahasa, alat, dan fungsi matematik terbina dalam membolehkan penerokaan pelbagai pendekatan dan mencapai penyelesaian yang lebih cepat berbanding dengan *spreadsheet* atau bahasa pengaturcaraan tradisional, seperti C / C++ atau Java. Idris (1999) menyatakan bahawa dengan berdasarkan kaedah matrik, masalah dapat diselesaikan dengan mudah tanpa perlu menulis kod pengaturcaraan secara terperinci sebagaimana yang diperlukan seperti C, Basic dan Fortran.

MATLAB adalah bermaksud *Matrix Laboratory*, kerana sistemnya direka untuk melakukan pengiraan matrik dengan mudah. MATLAB turut berkemampuan menganalisis data dengan baik. Seperti dikatakan oleh Marchand dan Holland (2002), MATLAB adalah antara perisian terbaik dalam mengendalikan pengiraan untuk memperoleh data dan menampilkan ia dalam pelbagai bentuk grafik. Hahn dan Valentine (2010) turut mengatakan, bahawa MATLAB adalah satu perisian komputer yang berkuasa untuk melakukan pengiraan di dalam bidang sains dan kejuruteraan.

3.4 Rumus yang digunakan oleh kaedah kajian

Kaedah kajian yang dibina di dalam kajian ini menggunakan pengiraan sebagai tunjang utama pembinaannya. Nilai jangkaan masa gemaan dan pekali serapan yang diterbitkan adalah berdasarkan rumus asal dan rumus yang diubahsuai dari rumus yang sedia ada.

Rumus yang digunakan adalah rumus Sabine kerana ia adalah rumus asal yang dibina untuk mengira masa gemaan. Rumus ini digunakan untuk menjalankan fungsi kaedah kajian seterusnya menjangkakan masa gemaan. Penilaian rumus Sabine dilakukan untuk membuktikan ia relevan digunakan untuk menjangkakan masa gemaan. Penilaian ini menggunakan cara perbandingan dengan rumus sedia ada

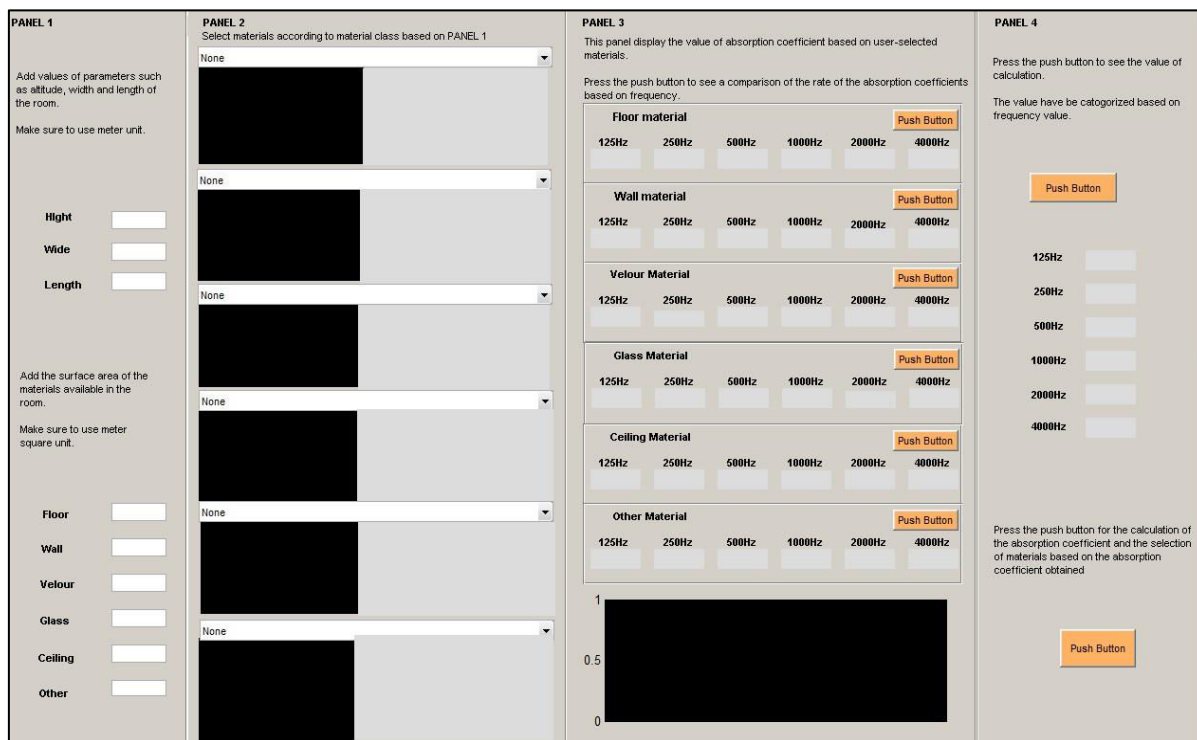
iaitu Eyring dan Millington-Sette. Perbandingan dilakukan dengan menggunakan parameter bilik sebenar.

Jangkaan pekali serapan bahan turut menggunakan rumus Sabine. Tetapi rumus Sabine diubahsuai supaya nilai pekali serapan menjadi tajuk rumus. Berikut merupakan rumus yang digunakan:-

$$\bar{\alpha} = \frac{\left[\frac{0.161 \times V}{T_{60}} \right]}{S} - S\bar{\alpha} \tag{4}$$

3.5 Ciri-ciri kaedah kajian

Kaedah kajian dibahagikan kepada dua aplikasi utama iaitu untuk pengiraan masa gemaan (Rajah 3.2) dan pemilihan bahan penyerap bunyi (Rajah 3.3). Pada aplikasi mengira masa gemaan, ia dibahagikan kepada 4 panel iaitu parameter bilik, senarai bahan utama bilik, paparan nilai pekali serapan bahan dan keputusan pengiraan masa gemaan. Di dalam aplikasi pemilihan bahan penyerap bunyi, panel turut terbahagi kepada empat iaitu parameter bilik, pemilihan bahan utama bilik, paparan kadar pekali serapan dan bahan pilihan mengikut kadar pekali serapan.



Rajah 3.2: Paparan keseluruhan perisian pengiraan masa gemaan

PANEL 1
Enter the desired value of the reverberation time.
Add the rate of surface area of absorption material required
Reverberation Time
Surface Area
Add values of parameters such as altitude, width and length of the room.
Make sure to use meter unit.
Height
Wide
Length
Add the surface area of the materials available in the room.
Make sure to use meter square unit.
Floor
Wall
Velour
Glass
Ceiling
Other

PANEL 2
Select materials according to material class based on PANEL 1
Floor
None
None
None
None
None
None

PANEL 3
This panel display the value of absorption coefficient based on user-selected materials.
Floor material
125Hz 250Hz 500Hz 1000Hz 2000Hz 4000Hz
Wall material
125Hz 250Hz 500Hz 1000Hz 2000Hz 4000Hz
Velour Material
125Hz 250Hz 500Hz 1000Hz 2000Hz 4000Hz
Glass Material
125Hz 250Hz 500Hz 1000Hz 2000Hz 4000Hz
Ceiling Material
125Hz 250Hz 500Hz 1000Hz 2000Hz 4000Hz
Other Material
125Hz 250Hz 500Hz 1000Hz 2000Hz 4000Hz
Press the push button to calculate absorption coefficient value
Panel
125Hz 1000Hz
250Hz 2000Hz
500Hz 4000Hz
Push Button

PANEL 4
Select the range of absorption coefficient value that represent the suitable materials
Select the material according frequency required
125 Hz 250 Hz
0.01-0.05 0.01-0.05
0.06-0.1 0.06-0.1
0.2-0.5 0.2-0.5
0.6-0.1 0.6-0.1
500 Hz 1000 Hz
0.01-0.05 0.01-0.05
0.06-0.1 0.06-0.1
0.2-0.5 0.2-0.5
0.6-0.1 0.6-0.1
2000 Hz 4000 Hz
0.01-0.05 0.01-0.05
0.06-0.1 0.06-0.1
0.2-0.5 0.2-0.5
0.6-0.1 0.6-0.1

Rajah 3.3: Paparan keseluruhan perisian pengiraan pekali serapan bahan

3.5.1 Aplikasi pengiraan masa gemaan

Rajah 3.4 menunjukkan bahagian untuk diisi data ciri-ciri utama bilik yang diperlukan untuk mengira masa gemaan. Di panel ini terdapat sembilan *edit text*. Tiga teratas adalah untuk diisi dengan data bilik iaitu tinggi, lebar dan panjang bilik. Ketiga-tiga parameter ini digunakan di dalam rumus untuk pengiraan isipadu bilik. Selain ketiga-tiga *edit text* yang telah dinyatakan, enam kotak *edit text* digunakan untuk mengumpul data keluasan permukaan bahan utama yang terdapat di dalam bilik.

RUJUKAN

- Abouchacra, K.S., Janet Koehnke, J., Besing, J. and Letowski. T. (2011) Sentence recognition in the presence of competing speech message presented in audiometric booths with reverberation time of 0.4 and 0.6 seconds. Elsevier Ltd, Archives of acoustics. 3-14
- Antonio, Q. R. (2010) Measurement of the sound-absorption coefficient on egg cartons using the Tone Burst Method. AMTA'10 Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Acoustics & Music: Theory & applications. 24-29.
- Arenas, J. P. and Crocker, M. J. (2010) Recent trends in porous sound-absorbing materials. SandV, Sound and Vibration. 12-17
- Aretz, M. and Orłowski, R. (2009) Sound strength and reverberation time in small concert halls. Elsevier Ltd, Applied Acoustics. 1099-1110
- Astolfi, A. Corrado, V. and Griginis, A. (2007) Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms. Elsevier Ltd, Applied Acoustics. 966-976
- Barron, R. F. (2003) Industrial Noise Control and Acoustics, Marcel Dekker, Inc. 269-270, 281-291
- Bies, D. A. and Hansen, C. H. (2003) Engineering Noise Control, Theory and Practice, 3rd ed, Spon Press, Tylor and Francis Group. 273, 300-302.
- Billon, A. Picaut, J. and Sakout A. (2007) Prediction of the reverberation time in high absorbent room using a modified-diffusion model. Elsevier Ltd, Applied Acoustics. 68-74
- Bistafa, S. R. and Bradley, J. S. (2000) Predicting reverberation times in a simulated classroom. JASA. 1721-1731
- Bohn, D. A. (1988) Environmental effects on the speed of sound. Journal of the Audio Engineering Society 36 (4). 223-231
- Bot, A.E. (2002) A function equation for specular reflection of rays. JASA 112 (4). 1276-1287.

- Cavanaugh, W. J. and Wilkes, J.A. (1999) Architectural Acoustics, Principles and Practice. John Wiley and Sons, Inc. 59-61, 59-62, 61-62
- Coley, D.A. (2002) The reverberation time of tall spaces. Elsevier Science, Journal of sound and vibration. 595-598
- Dance, S. M., and Shield, B. M. (1999) Modeling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces. Part I: Performance spaces. Elsevier Ltd, Applied Acoustic. 1-18
- Daheng, Y., and Qi, L. (2012) Research of computer simulation of reverberation time in classroom. Elsevier Ltd, Physics Procedia. 1677-1682.
- Everest, F. E. (1997) Sound Studio Construction on a Budget. Mc Graw Hill. 202-205
- Dias, T., and Monaragala, R. (2007) Analysis of sound absorption of tuck spacer fabrics to reduce automotive noise. Measurement Science and Technology, 2657-2666
- Diaz, C. and Pedro, A. (2004) The reverberation time of furnished room in dwellings. Elsevier Ltd, Applied Acoustics. 945-956
- Egan, M. D. (1988) Architectural Acoustics, Mc Graw Hill. 38, 42-43, 328
- Everest, F. A. and Pohlmann, K. C. (2009) Master Handbook of Acoustics, 5th ed, Mc Graw Hill. 151-155, 159-160, 164-165, 180-182, 187- 197, 193-197.
- Eyring, C.F. (1930) Reverberation time in “dead” rooms. JASA 26. 217-241
- Hahn, B. H. and Valentine, D. T. (2009) Essential Matlab for Engineer and Scientists, Fourth Edition, Academic Press. 1-3
- Han, Z., Chunsheng, L., Kombe, T. and Thong-On, N. , (2007) Crumb rubber blends in noise absorption study. RILEM, Materials and Structures. 383-390
- Hodgson, M. and Scherebnyj, K. (2005) Estimation of the absorption coefficient of the surface of classrooms. Elsevier Ltd, Applied Acoustics. 936-944
- Honarvar, M. G., Asghar, A., Jeddi, J. and Tehran, M. A., (2010) Noise absorption modeling of rib knitted fabrics. Textile Research Journal. 1392-1404
- Hong-Ru, S., Wen-Fang, H. and Han, Z. (2011) Experimental study on a thickness-adjustable absorber for reverberation controlling. Second International Conference on Digital Manufacturing and Automation. 519-522.

- Horvat, M. Jambrosic, K. and Domitrovic. H. (2008) Reverberation time measurement in reverberant space. 50th International Symposium ELMAR, 2008.. 309-315
- Idris, A. (1999) MATLAB for Engineering Students, Practice Hall. 1-3
- ISO 3382-1 (2009) Measurement of room acoustic parameters
- Jean, B. D. and Marie, A. G. (2007) Active absorption to reduce the noise transmitted out of an enclosure. Elsevier Ltd, Applied Acoustic. 142-152.
- Kendrick, P., Shers, N. and Conetta, R. , (2012) Blind estimation of reverberation time in classroom and hospital wards. Elsevier Ltd, Applied Acoustics.1-11
- Kuttruff, H. (1991) Room Acoustics, 3rd ed, Elsevier Applied Science.50, 85-91, 133-134, 218-219
- Lewis, H. B. and Douglas, H. B. (1994) Industrial Noise Control, Fundamentals and Applications, Second Edition, Revised and Expanded, Marcel Dekker, Inc. 330-336
- Marchand, P. and Holland, D. T. (2002) Graphics and GUIs with MATLAB, Third Edition, Chapman and Hall, 1-2
- Marsch. J and Porschmann, C. (1999) Frequency dependent control of reverberation time for auditory virtual environments.Elsevier Science Ltd, Applied Acoustics. 189-198
- Martellotta, F., Crociata, S. D., and D'Alba, M. (2011) On site validation of sound absorption measurement of occupied pews. Elsevier Ltd, Applied Acoustic. 923-933
- Millington, G. A (1932) Modified formula for reverberation J. Acoust. Soc. Am. 4. 69-82
- Meissner, M. (2007) Influence of wall absorption on low-frequency dependence of reverberation time in room of irregular shape. Elsevier Ltd. Applied Acoustics. 583-590
- Mikulski, W. and Radosz, J. (2011) Acoustics of classrooms in primary schools- Results of the reverberation time and the speech transmission index assessments in selected buildings. Archives of acoustics. 777-793.
- Neubauer, R. and Kostek, B. (2002) Prediction of the reberation time in rectangular rooms with non uniform distributed sound absorption. Thesis Technical University of Gdansk,Pl.

- Okuzono, T., Otsuru, T., Tomiku, R. and Okamoto, N. (2012) Application of Modified Integration rule to time-domain finite-element acoustic simulation of room. *J. Acoust. Soc. Am*, 132(2). 804-813.
- Passero, C.R.M. and Zannin, P.H.T. (2010) Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades's formula." *App. Acoust.* **71**(12). 1204-1210
- Pavlovic, D.S., Mijic, and Kurtovic, M. H. (2006) A simple sound source for measurements in room acoustics. *Elsivier Ltd Applied acoustics*. 378-383.
- Peer, I. Rafaely, B. and Zigel, Y. (2008) Room acoustics parameters affecting speaker recognition degradation under reverberation. *HSCMA journal*. 136-139
- Rhiana, F., Sarwono, J. and, Soelami. (2011) Simulation and analysis of acoustical comfort in an intensive care unit. *2nd International Conference on Instrumentation Control and Automation*. 352-357
- Rossing, T. D., Moore F. R. and Wheeler, P. A. (2002) *The Science of Sound*, 3rd ed, Addison Wesley. 525-526, 529-530, 534-535, 581-582
- Sabine, W.C. (1922) *Collected Paper on Acoustic*. Harvard University, Cambridge, MA.
- Sant'Ana, D. Q. and Zannin, P. H. T. , (2010) Acoustic evaluation of acontemporary church based on in situ measurements of reverberation time,definition and computer-predicted speech transmission index.Elsevier Ltd, *Building and environment*. 511-517.
- Seddeq, H. S. (2009) Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 4610-4617
- Shabtai, N. R., Rafaely, B. and Zigel, Y. (2010) The effect of reverberation on the performance of spectral mean subtraction in speaker verification, Elsevier Ltd, *Applied Acoustics*. 124-126
- Tang, S.K. and Yeung. M. H. (2005) Reverberation times and speech transmission indices in classrooms. Elsevier Ltd, *Journal of Sound and Vibration*. 596-607
- The American Heritage Dictionary of the English Language* (2000) Fourth Edition. Houghton Mifflin Company.
- Vallet, M. and Karabiber, Z. (2002) Some European policies regarding acoustical comfort in educational buildings. *Noise Control Engineering Journal*. 58-62

- Wang, S. Y., Chang, F. C. and Lin, F. C. (2004) The amount of wooden material in a closed room and its effect on the reverberation time. 53rd Annual Meeting of the Japan Wood Research Society, Fukuoka. 474-479
- Webb, J. D., and Bines, R. D. (1991) Noise Control in Industry, 3rd ed, Sound Research Laboratories Ltd, E and F. N. Spon. 53, 45-47
- Yoo, H. (2001)The Room Acoustics of gymnasium building. KORUS IEEE. 35-38
- Zhou, R. and Crocker, M.J. (2010) Boundary element analyses for sound transmission loss of pane. J. Acoust. Soc. Am, 127(2). 829-840