

PENENTUAN KEDUDUKAN PENDERIA PANCARAN AKUSTIK PADA ENJIN DIESEL UNTUK PEMONITORAN KELIKATAN MINYAK PELINCIR

OTHMAN INAYATULLAH¹, MOHD JAILANI MOHD NOR², NORDIN
JAMALUDDIN³ & TAIB ISKANDAR MOHAMAD⁴

Abstrak. Kajian ini bertujuan mengenal pasti kedudukan penderia pancaran akustik yang paling baik dalam pemantauan kelikatan minyak pelincir dengan menggunakan blok enjin diesel sebagai model kajian. Setiap isyarat yang dirambat akan diterjemahkan ke dalam isyarat domain masa dan jelmaan fourier pantas. Tumpuan parameter kajian adalah nilai tenaga pancaran akustik. Hasil kajian ini pula menunjukkan bahawa nilai parameter berbeza pada setiap kedudukan penderia yang disebabkan oleh jarak penderia dari sumber tenaga pancaran akustik dengan nilai faktor k yang malar. Hasil kajian menunjukkan kedudukan penderia yang paling baik untuk pemantauan kelikatan minyak pelincir pada enjin adalah di bahagian bawah, iaitu pada penghujung skrit ombok semasa ombok berada di pusat mati bawah. Ini menunjukkan bahawa jarak penderia dari pusat sumber isyarat mempengaruhi nilai tenaga pancaran akustik.

Kata kunci: Tenaga pancaran akustik; kelikatan minyak pelincir; faktor k ; kedudukan penderia

Abstract. This works aim to characterize the better sensor location in lubrication viscosity monitoring using diesel block as a media. The entire signal propagation was analysis by time domain and Fast Fourier Transform. The acoustic emission energy is the important parameter in this study. The result shows that for different parameter sensor location, a different parameter value is obtained because of the distance between sensor location and acoustic emission energy source with constant k factor. From the result, the best sensor location for monitoring lubrication viscosity in engine is at the end of the piston skirt when the piston is at under bottom dead center. The influence of acoustic emission energy is the length of the sensor located is considered.

Keywords: Acoustic emission energy; lubrication viscosity; k factor; sensor location

1.0 PENGENALAN

Teknik pancaran akustik ataupun gelombang tegasan telah terbukti kemampuannya dalam pemantauan kerosakan ataupun pencapaian

¹⁻⁴ Kumpulan Penyelidikan MEMs Automotif, Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan
Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia
Tel:+603-89216015, Fax:+603-89216016. Email: othathiah@vlsi.eng.ukm.my

operasi enjin diesel. Sebahagian enjin diesel, kemampuan kesempurnaan nisbah isyarat dengan bunyi dalam julat frekuensi pancaran akustik dapat membezakan data terperinci setiap aktiviti mekanik dan mekanik bendalir pada setiap kitaran [1]. Isyarat pancaran akustik ini digunakan untuk memantau kerosakan pada injap ekzos [2], perilaku suntikan bahan api [3] dan pelbagai aspek dalam proses pembakaran [4]. Pada amnya, isyarat pancaran akustik yang berfrekuensi tinggi, iaitu antara julat 0.1 MHz hingga 1 MHz kerap kali digunakan dalam pemantauan keadaan enjin. Ini disebabkan oleh isyarat pancaran akustik tidak dipengaruhi oleh isyarat getaran seluruh badan atau getaran sampingan yang terhasil semasa pergerakan komponen mekanik dan bendalir.

Teknik pancaran akustik mempunyai kelebihan yang lebih baik dari pemantauan dinamik yang lain terutama sekali dalam pemantauan pecutan, di mana analisis isyarat boleh ditumpukan kepada sesuatu proses seperti kesan hentaman yang terhasil semasa pengoperasian injap dan juga berkaitan dengan aliran bahan api semasa suntikan. Selama ini, kebanyakan penyelidikan hanya tertumpu kepada penafsiran isyarat dari satu penerima dan penumpuan hanya kepada diagnosis kerosakan sahaja. Pada kebiasaannya sumber isyarat pancaran akustik enjin diesel dalam keadaan bertindih. Ini disebabkan oleh aktiviti komponen yang menghasilkan isyarat sampingan seperti pergerakan injap ekzos, penyuntik bahan api, pembakaran semasa lejang kuasa, galas dan peralatan sampingan yang lain.

Dengan menggunakan tatasusunan penerima yang baik dan betul, ianya dapat mengurangkan berlakunya gangguan isyarat. Untuk mencapai tahap ini, tumpuan pencarian kedudukan penerima yang terbaik merupakan keutamaan yang perlu dilakukan sebelum memulakan sesuatu uji kaji. Pencarian kedudukan ini juga penting untuk menstabilkan kesan gangguan isyarat yang terhasil sama ada pada atau luar kedudukan penerima.

Pengesanan kedudukan sumber isyarat menggunakan teknik pancaran akustik telah banyak digunakan di dalam pengesanan kebocoran, keretakan dan pemantauan struktur [5], isyarat yang terhasil boleh diterjemahkan sebagai geometri jangkaan. Ini sebenarnya bergantung kepada kemampuan pengkaji menganalisis kewujudan sumber isyarat. Dalam kajian ini, jarak penyebaran gelombang daripada enjin diesel adalah kecil dan jarak keupayaan tindak balas isyarat berkemungkinan besar menjadikan analisis isyarat lebih rumit. Namun begitu, gelombang elastik yang terhasil boleh memaparkan keadaan geometri pada gelombang permukaan, gesaran dalaman, penghamburan tenaga dan penyebaran halaju semasa pengoperasian enjin disel [6, 7]. Dengan kata lain, kedudukan penerima menjadi penting untuk menganalisis dan melihat bentuk sesuatu geometri aktiviti kerana isyarat yang terbentuk boleh memperlihatkan kedudukan aktiviti dalam ruang pembakaran enjin diesel.

Terdapat dua kaedah mengesan kedudukan sumber isyarat, iaitu dengan penggunaan 1 penderia ataupun 3 penderia serentak. Penggunaan 3 penderia berbentuk segitiga dengan teknik berasaskan halaju dan tenaga secara serentak memperlihatkan ketepatan kedudukan sumber isyarat dengan lebih baik, iaitu dengan mendapatkan titik penyilangan dua hiperbola. Namun begitu, penggunaan 1 penderia dengan kaedah berasaskan halaju lebih sesuai pada perambatan isyarat pancaran akustik yang pantas, iaitu perambatan masa singkat dibandingkan dengan penggunaan 3 penderia [8-10]. Tumpuan sebenar kertas kajian ini ialah untuk melihat kesesuaian penempatan penderia pancaran akustik dengan menggunakan 1 penderia pada blok enjin diesel dalam pemantauan kelikatan minyak pelincir semasa enjin beroperasi.

2.0 TENAGA PANCARAN AKUSTIK

Pancaran akustik boleh digambarkan sebagai gelombang elastik yang terhasil semasa bahan atau komponen berada dalam tegasan. Kewujudan gelombang elastik dalam bidang pemantauan keadaan disebabkan oleh pergerakan permukaan antara komponen. Pergerakan ini diukur menggunakan penderia yang sensitif.

Gelombang elastik isyarat singkat terhasil disebabkan oleh pembebasan tenaga berulang-ulang dari sumber antara komponen. Secara khusus, fenomena ini sebenarnya berlaku dalam enjin diesel, iaitu semasa enjin sedang beroperasi. Komponen enjin yang bergerak akan membebaskan tenaga secara berulang-ulang dan ianya boleh dirambat oleh penderia pancaran akustik. Isyarat pancaran akustik yang terhasil boleh diterjemahkan kepada geometri keadaan enjin tersebut [2, 4, 11-14]. Isyarat tersebut boleh diterjemahkan kepada isyarat domain masa dan jelmaan fourier pantas.

Gelombang tegasan yang kebiasaannya dirambat daripada pemantauan keadaan bahan yang bercirikan isotropi, tak terhingga, homogen dan keanjalan lurus merupakan gelombang tegasan membujur dan gelombang tegasan melintang. Gelombang tegasan ini menghasilkan anjakan gelombang satah di mana vektor u merupakan perambatan serentak dengan fasa halaju c dan boleh diperolehi melalui Persamaan (1) [15]:

$$u = f(xp - ct)d \quad (1)$$

di mana x merupakan posisi vektor, d dan p merupakan parameter vektor yang diperolehi dari arah pergerakan, t adalah masa dan f adalah frekuensi pergerakan gelombang. Anjakan vektor u juga merupakan penaklukan melalui persamaan kebezaan pergerakan [15].

Melalui penyelesaian Persamaan (2), fasa halaju gelombang bergantung kepada ketumpatan dan pemalar anjal *Lame's* bahan tersebut. Selain itu, fasa halaju ini sebenarnya tidak bergantung kepada anjal pergerakan gelombang dalam bahan [16]. Teori ini pada asasnya digunakan dalam pemantauan dalaman.

$$\mu_L \nabla^2 u + (\lambda + \mu_L) \nabla \nabla u = \rho \ddot{u} \quad (2)$$

di mana ρ adalah ketumpatan bahan, \ddot{u} adalah cepatan gelombang tegasan dan μ_L serta λ adalah pemalar anjalian *Lame's* yang boleh ditentukan melalui Persamaan (3) dan (4):

$$\mu_L = \frac{E_y}{2(1-\nu_p)} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{E_y \nu_p}{(1+\nu_p)(1-2\nu_p)} \quad (4)$$

di mana E_y merupakan modulus Young sesuatu bahan dan ν_p adalah nisbah Poissonnya.

Dalam aspek pemantauan permukaan bahan, gelombang tegasan yang terhasil merupakan gelombang Rayleigh yang juga dikenali sebagai gelombang dalam separa-ruang [15]. Melalui persamaan eksponen, vektor u untuk fasa halaju Rayleigh c_R boleh diperolehi dari Persamaan (2) dan menghasilkan Persamaan (5) [15]:

$$\left(2 - \frac{c_R^2}{c_T^2}\right)^2 - 4 \left(1 - \frac{c_R^2}{c_L^2}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{c_R^2}{c_T^2}\right)^{1/2} = 0 \quad (5)$$

dengan c_T merupakan halaju gelombang tegasan melintang dan c_L pula merupakan halaju gelombang tegasan membujur.

Dalam pengukuran sebenar menggunakan pancaran akustik, gelombang permukaan yang dirambat menyerupai gelombang tegasan Lamb, di mana fasa halaju gelombang tegasan Lamb bergantung kepada panjang gelombang dan frekuensi tidak seperti gelombang tegasan Rayleigh, gelombang tegasan

membujur dan melintang. Rambatan gelombang tegasan Lamb disebabkan oleh penyebaran muka gelombang. Penyebaran muka gelombang bermaksud fasa halaju berubah mengikut frekuensi dan ianya dikenali sebagai penyebaran halaju [7].

Pada kebiasaannya gelombang tegasan yang dirambat oleh pancaran akustik terbentuk dalam dua keadaan, iaitu berterusan dan cetusan. Dalam pemantauan enjin, gelombang tegasan yang terhasil adalah dalam bentuk cetusan. Halaju c_e gelombang tegasan untuk besi tuang adalah 0.485 cm/mikro-saat [15] yang berbentuk cetusan boleh dirumuskan menjadi Persamaan (6).

$$c_e = c + k_w \frac{d_c}{dk_w} \quad (6)$$

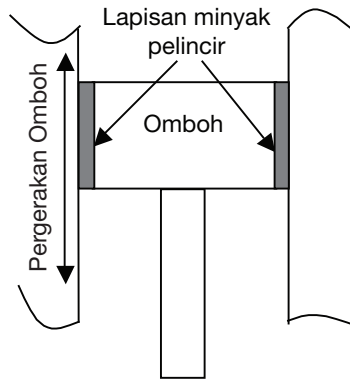
di mana c_e dikenali sebagai kumpulan halaju bahan, c adalah halaju fasa gelombang tegasan, d_c adalah puncak amplitud pada jarak permukaan yang disebabkan oleh gelombang tegasan membujur, k_w adalah bilangan gelombang yang boleh diperolehi melalui Persamaan (7),

$$k_w = \frac{2\pi}{\Lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (7)$$

dengan Λ adalah panjang gelombang, f adalah frekuensi pergerakan gelombang.

Berdasarkan kajian Jiaa dan Dornfeld [17], iaitu kajian *pin on disk* dalam sentuhan gelangsar, kadar tenaga yang terhasil semasa pengelangsaran tersebut adalah berkadar dengan $(\tau_s A_s v_s)^{\frac{m}{2}}$, di mana τ_s adalah kekuatan ricih, A_s adalah luas kawasan sentuhan sebenar, v_s pula adalah halaju gelangsar dan m pula adalah pemalar diukur dari sistem bahan dan nilainya boleh diandaikan 1.

Untuk pemantauan kelikatan minyak pelincir, tenaga pancaran akustik dibebaskan semasa berlakunya pengelongsoran ombok ke atas lapik silinder yang mana minyak pelincir bertindik sebagai pengantara. Kejadian ini ditunjukkan dengan ringkas dalam Rajah 1.



Rajah 1 Pengelansaran omboh di atas permukaan minyak pelincir semasa pergerakan omboh menjana tenaga pancaran akustik

Tumpuan kajian ini hanya melihat nilai terbitan tenaga pancaran akustik hasil penyebaran isyarat daripada penempatan penderia dalam pemantauan kelikatan minyak pelincir. Tenaga isyarat boleh dianggarkan daripada nilai min kuasa dua terhadap masa, t . Ini dinyatakan melalui Persamaan (8) [8-10]:

$$E = \int_0^t v_o^2(t) dt \quad (8)$$

dengan v_o merupakan amplitud maksimum isyarat yang berkadar dengan punca kuasa dua tenaga [18], t adalah masa dalam nilai saat dan E adalah tenaga pancaran akustik dalam nilai Joule. Isyarat akan mengalami susutan tenaga pancaran akustik apabila melalui bahantara separa tak terhingga seperti semasa pengembaraan gelombang dengan merujuk kepada hukum penyerapan mudah di Persamaan (9) [8-10]:

$$E_u = E_o e^{-ks} \quad (9)$$

di mana E_u adalah tenaga pancaran akustik pada jarak s dari sumber, E_o pula merupakan tenaga dari sumber, k merupakan faktor pengecilan dan s merupakan jarak antara penderia dengan sumber.

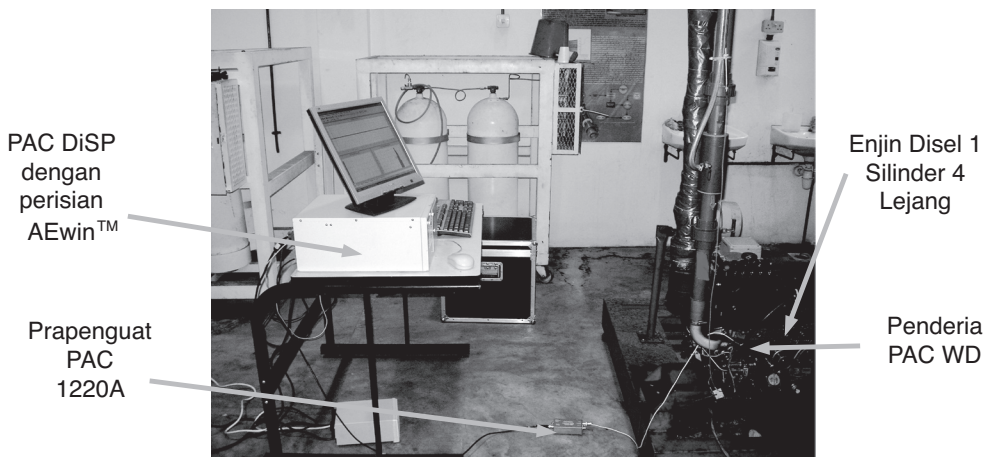
Nilai k sebenarnya malar dan ianya menyamai dengan nilai halaju gelombang tegasan dalam bahan. Dalam enjin diesel, tenaga pancaran akustik boleh dijangkakan dengan mengambil kira isyarat pada domain sudut [19] dalam nilai arbitrari,

$$E = \int_a^b A(\theta) d\theta \quad (10)$$

di mana $A(\theta)$ adalah amplitud pancaran akustik dan θ adalah sudut aci engkol. Merujuk kepada Persamaan (9), di mana k adalah nilai yang terlalu kecil dan menghampiri sifar dan ini membolehkan susutan tenaga pada Persamaan (10) boleh diabaikan [19]. Ini menyebabkan perubahan θ tidak memberi apa-apa kesan terhadap nilai tenaga pancaran akustik dalam pemantauan kelikatan minyak pelincir.

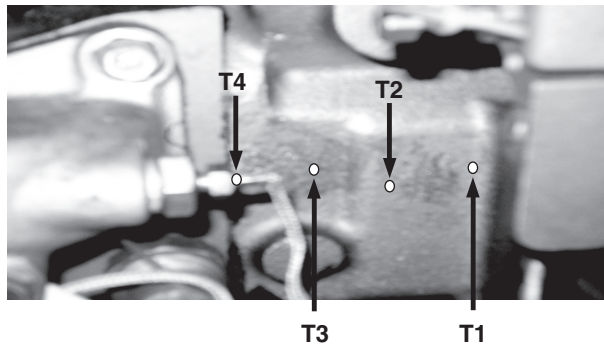
3.0 KAEDAH KAJIAN

Kajian ini menggunakan enjin disel 1 silinder, 4 lejang dengan diameter silinder 85 mm dan jarak lejang 87 mm melintang sebagai peralatan kajian. Enjin berada di atas *rig dynamometer*. Penderia yang digunakan adalah daripada jenis PAC WD dengan julat suhu pengoperasian antara -65°C hingga 177°C . Julat operasi frekuensi pula antara 100 kHz hingga 1000 kHz dan frekuensi salunan sebanyak 125 kHz. Penggunaan prapenguat PAC 1220A dengan gandaan 40 dB adalah bertujuan meningkatkan isyarat aras rendah kepada aras talian. Isyarat yang terhasil dirakam dan diperlihatkan melalui peralatan pancaran akustik jenis PAC DiSP dengan perisian *AEwin™ ver 1.30*. Susun atur kelengkapan kajian ditunjukkan dalam Rajah 2.

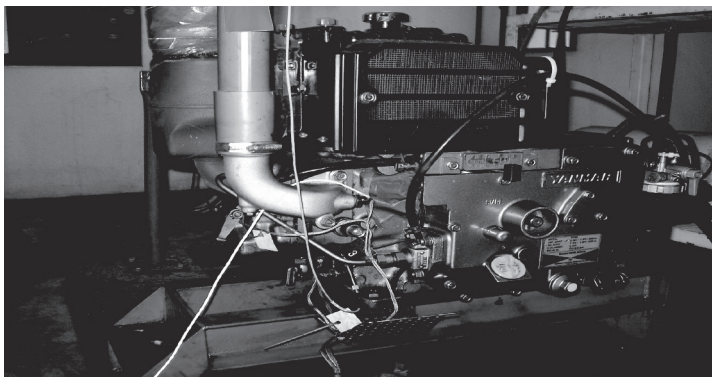


Rajah 2 Susun atur kajian yang digunakan

Terdapat 4 kedudukan penderia yang menjadi kawasan cerapan sumber isyarat pancaran akustik. Kesemua kedudukan ini ditandakan sebagai T. Kedudukan T1 hingga T4 mengikut urutan seperti dalam Rajah 3. T1 adalah kedudukan penderia di penghujung bawah silinder seperti ditunjukkan dalam Rajah 4 dan T4 pula adalah kedudukan penderia di penghujung atas silinder. T2 merupakan kedudukan penderia sejauh 70 mm dari T1 dan jarak T3 dari T1 adalah 95 mm. Jarak T4 dari T1 adalah 157 mm seperti mana yang ditunjukkan dalam Rajah 5 secara gambar rajah keratan rentas.

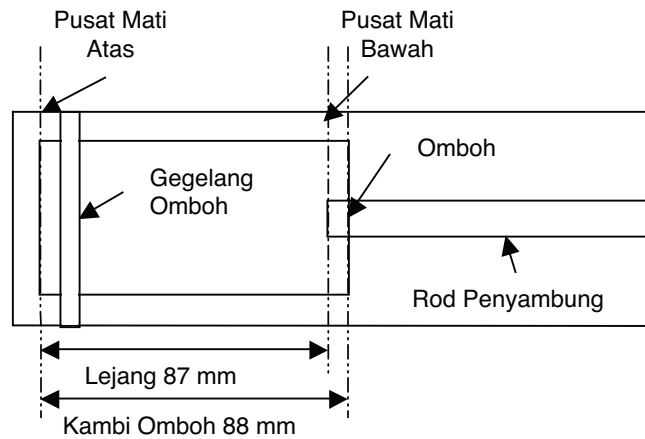


Rajah 3 Kedudukan penderia semasa kajian dimulai dari T1 hingga T4

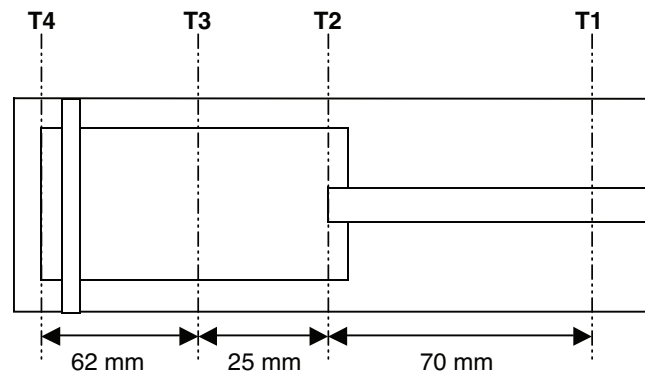


Rajah 4 Kedudukan penderia di enjin disel

Kedudukan T4 sebenarnya merupakan kedudukan penderia semasa pengukuran tekanan dalam silinder sewaktu lejang mampatan yang dilakukan oleh Ghamry [14]. Kedudukan T2 dan T3 pula merupakan kedudukan penderia semasa kajian perilaku tribologi tindak balas gegelang ombok dengan lapik silinder dengan teknik pancaran akustik yang dilakukan oleh Douglas [19].



(a)



(b)

Rajah 5 Gambar rajah keratan rentas (a) komponen dalaman silinder (b) kedudukan penderia

Dalam aspek ketebalan dinding silinder walaupun ianya tidak memberi kesan yang besar kepada tenaga pancaran akustik yang dirambat daripada setiap kedudukan penderia tetapi ianya memberi kesan terhadap masa terima isyarat dan berkaitan dengan frekuensi rendah [8,18]. Ini menyebabkan berlakunya *first break* yang mana isyarat mula dirambat selepas beberapa milli saat. Dalam kajian ini, ketebalan kedudukan penderia di T1 dan T2 adalah tidak sama dengan ketebalan kedudukan penderia di T3 dan T4. Perbezaan ketebalan adalah 8 mm, iaitu antara kedudukan T1 dengan T3. Maka itu, masa terima isyarat antara kedudukan penderia T1 dan T2 dengan kedudukan penderia T3 dan T4 tidak sama. Ini dibuktikan dalam hasil kajian melalui paparan analisis domain masa.

Kesemua kajian dibuat adalah semasa dalam enjin sedang beroperasi dengan laju putaran aci sesondol 1100 ppm. Tiada beban dikenakan semasa kajian dijalankan. Suhu minyak pelincir semasa kajian adalah malar, iaitu 50 °C dan suhu penyejukan pula pada 57 °C. Enjin menggunakan kaedah semburan dengan menggunakan pam untuk penghantaran minyak pelincir ke kepala silinder, gegelang omboh dan dinding silinder. Semburan minyak pelincir terhadap dinding silinder adalah melalui lubang yang terdapat pada rod penyambung.

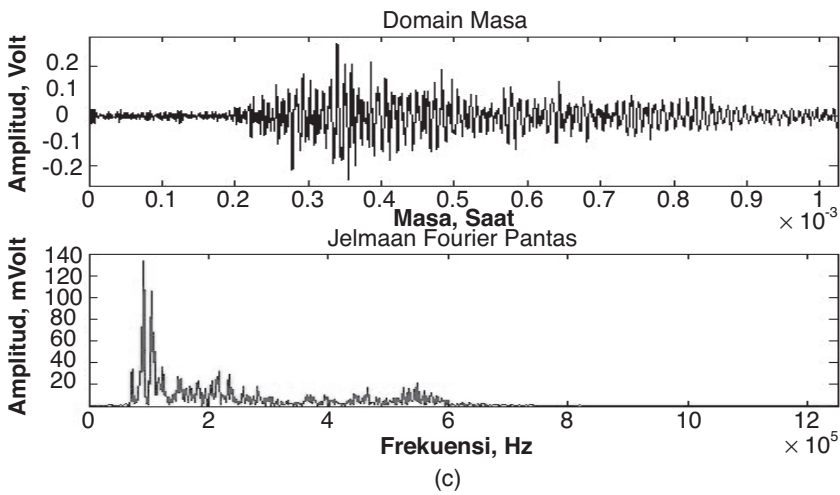
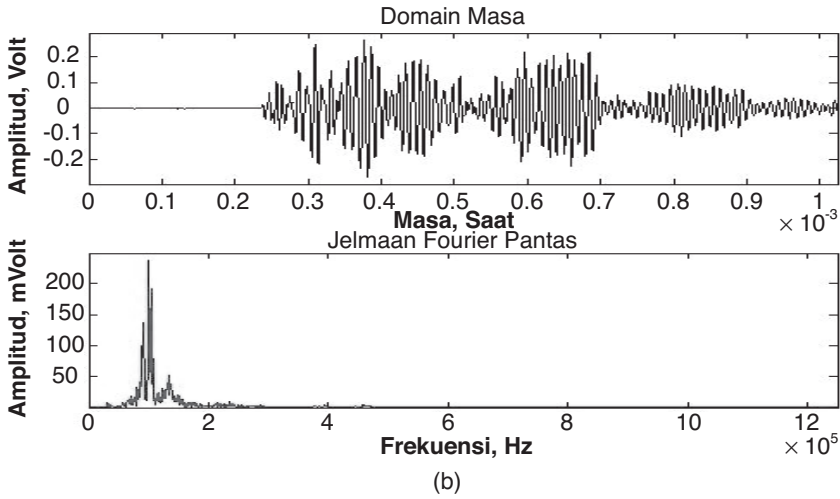
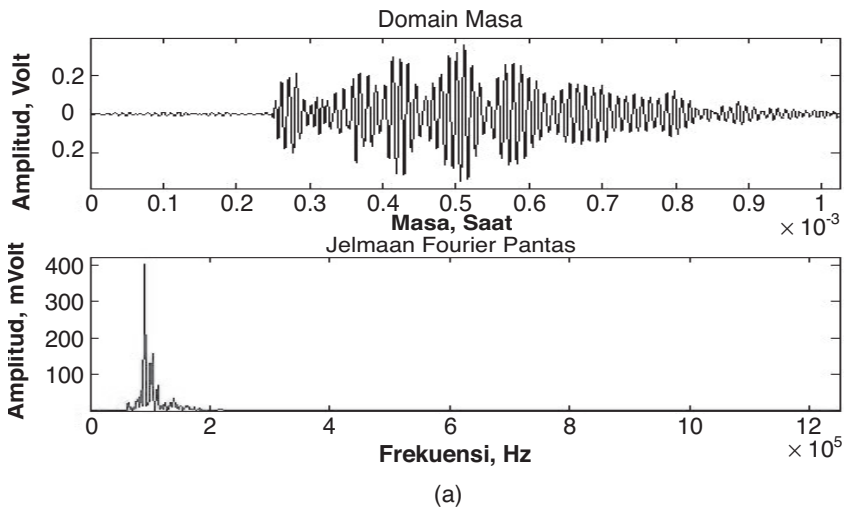
4.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

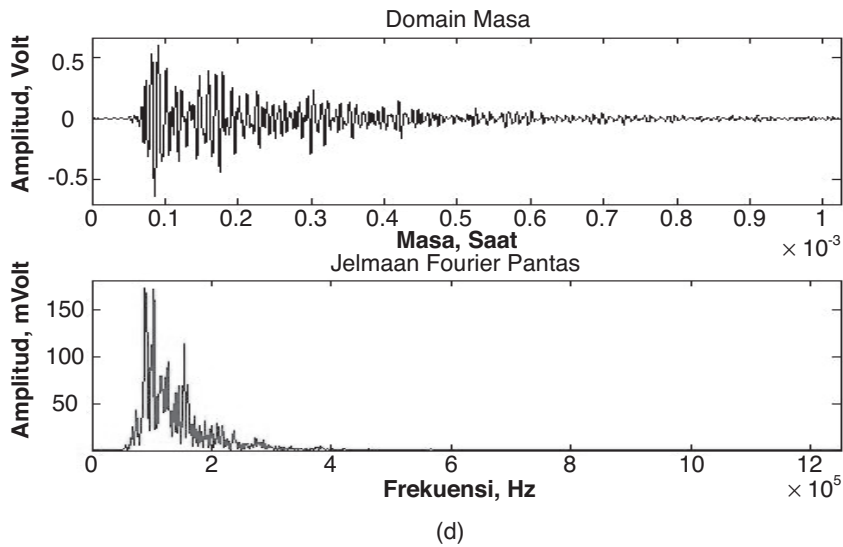
4.1 Keputusan

Tafsiran ketepatan tenaga pancaran akustik bergantung kepada ketepatan kedudukan penerima pada sumber isyarat. Hasil isyarat daripada 4 titik kedudukan penerima dianalisis dengan menggunakan kaedah domain masa dan jelmaan fourier pantas. Melalui analisis domain masa, nilai tenaga pancaran akustik yang merupakan parameter kajian adalah berbeza pada setiap kedudukan penerima. Masa tiba isyarat pada setiap kedudukan penerima berbeza seperti mana yang diterangkan di atas yang ditunjukkan dalam Rajah 6.

Pada kedudukan penerima di T1 dan T2, masa tiba isyarat hampir sama, iaitu lebih kurang 0.25 milli saat. Masa tiba isyarat pada kedudukan penerima T3 pula adalah 0.20 milli saat dan masa tiba isyarat yang paling pantas adalah di kedudukan T4, iaitu 0.08 milli saat. Kepantasan rambatan isyarat di T4 adalah disebabkan oleh ketebalan blok yang sedikit rendah, iaitu 8 mm dan di kedudukan ini penerima berada betul-betul di atas sumber isyarat tekanan.

Analisis domain masa dan jelmaan fourier pantas telah melihat bentuk isyarat yang berbeza antara titik kedudukan penerima seperti dalam Jadual 1 dan Rajah 6. Merujuk kepada Jadual 1 dan Rajah 6, penerima di T1 memperlihatkan isyarat yang dirambat lebih malar jika dibandingkan dengan lokasi penerima yang lain. Ini ditunjukkan dalam Rajah 7 dengan melihat taburan nilai kurtosis terhadap 25 bacaan pada setiap kedudukan penerima. Pada kedudukan penerima T1, kurtosis berada dalam bentuk *Platykurtic*. Pada kedudukan penerima T2, kurtosis berada dalam bentuk *Mesokurtic* dan pada kedudukan penerima T3 dan T4, kurtosis berada dalam bentuk *Leptokurtic*.



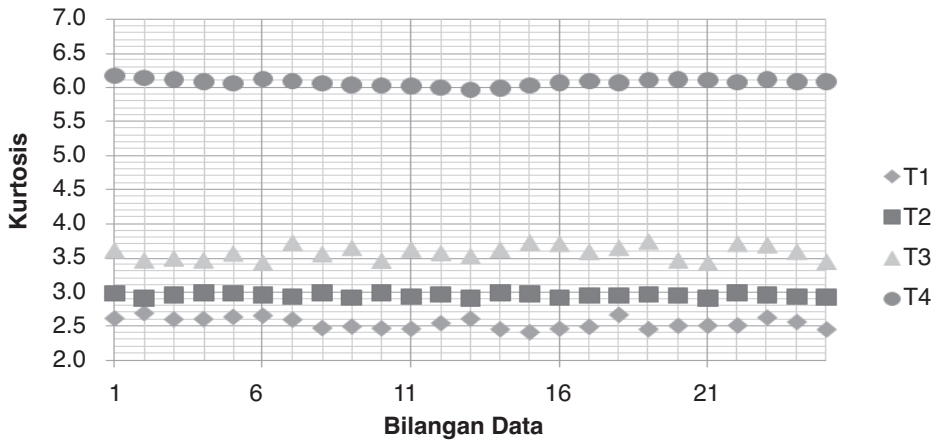


Rajah 6 Isyarat dari domain masa dan jelmaan fourier pantas di kedudukan (a) T1, (b) T2, (c) T3 dan (d) T4

Hasil kajian menunjukkan bahawa nilai kurtosis di kedudukan penerima T4 mempunyai nilai kurtosis yang paling tinggi dan ini sebenarnya disebabkan oleh perbezaan nilai amplitud semasa rambatan isyarat terlalu tinggi. Ini juga sebenarnya menunjukkan bahawa pada kedudukan ini isyarat yang dirambat merupakan campuran isyarat mampatan dan isyarat pelinciran. Pada kedudukan penerima T3, pengaruh isyarat mampatan mula berkurangan yang disebabkan oleh jarak antara kedudukan tersebut. Pengaruh ini terus berkurangan pada kedudukan penerima T2, ini menyebabkan nilai purata kurtosis menurun.

Jadual 1 Hasil kajian kedudukan lokasi penerima

Kedudukan penerima	Amplitud (Volt)	Punca min kuasa dua (Volt)	Kurtosis	Tenaga (milli Joule)
T1	0.35	0.13	2.54	230.2
T2	0.27	0.09	2.95	163.1
T3	0.29	0.08	3.57	144.3
T4	0.61	0.15	6.07	246.7

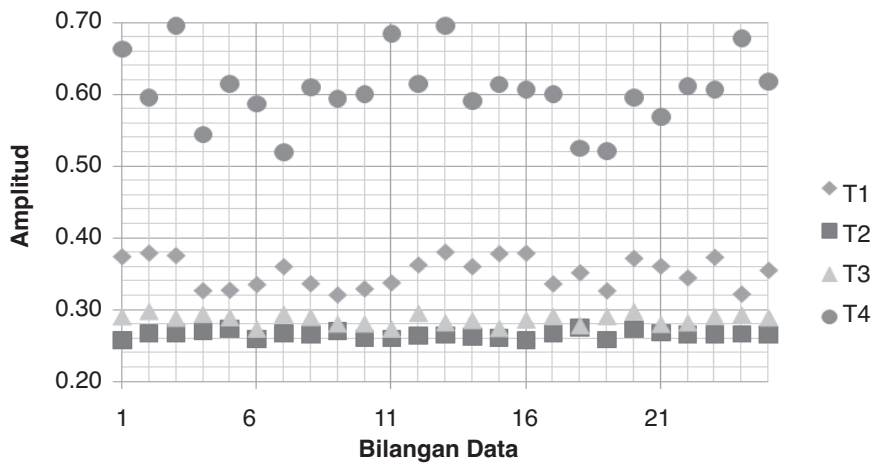


Rajah 7 Taburan kurtosis pada setiap kedudukan penderia dengan 25 bilangan bacaan

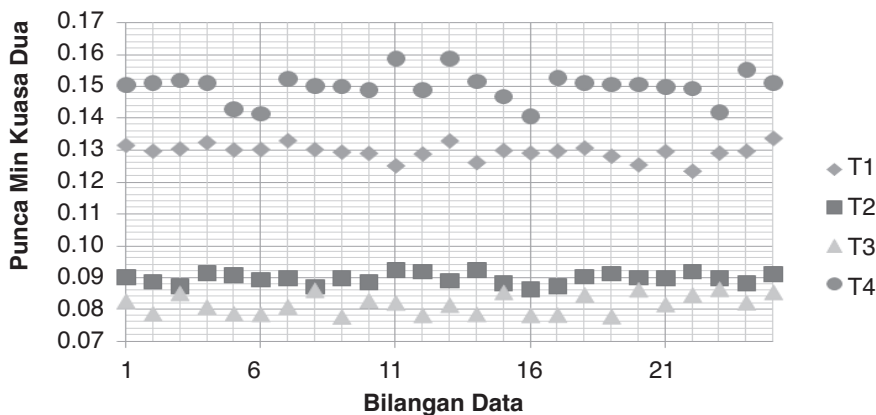
Melihat kepada parameter amplitud pula, nilai amplitud semasa kedudukan penderia di T4 merupakan nilai amplitud yang tertinggi. Ini adalah disebabkan oleh tekanan udara meningkat semasa lejang mampatan. Ianya menyebabkan isyarat yang dirambat menghasilkan nilai amplitud yang tinggi. Keadaan ini sebenarnya telah dibuktikan melalui kajian El-Gharmy [14] yang mana nilai tekanan dalam silinder semasa lejang mampatan boleh diandaikan melalui isyarat pancaran akustik. Nilai amplitud menurun pada kedudukan penderia di T3 dan menurun lagi di T2. Pada kedudukan penderia di T1, nilai amplitud meningkat semula. Jika di kedudukan T4, nilai amplitud merupakan rambatan isyarat semasa mampatan seperti mana yang diterangkan di atas, nilai amplitud di T1 pula adalah merupakan rambatan isyarat permulaan pengelongsoran ombok pada permukaan silinder. Hasil kajian ini diperlihatkan dalam Rajah 8.

Seperti parameter amplitud, nilai punca min kuasa dua (pmkd), penderia pada kedudukan T4 menunjukkan nilai yang tertinggi daripada kedudukan penderia yang lain. Ini adalah disebabkan tekanan yang terhasil semasa lejang mampatan seperti mana yang dinyatakan di atas. Namun begitu, nilai punca min kuasa dua penderia pada kedudukan T2 lebih tinggi sedikit daripada kedudukan T3. Ianya bertentangan dengan keadaan parameter amplitud seperti mana yang ditunjukkan dalam Rajah 9.

Daripada aspek nilai tenaga pancaran akustik, nilai di T1 adalah 230.2 milli Joule dan nilai di T4 pula adalah 246.8 milli Joule. Seperti mana yang dinyatakan dalam Jadual 1 di atas, nilai tenaga pancaran akustik pada setiap kedudukan penderia merupai kedudukan punca min kuasa dua seperti mana yang ditunjukkan dalam Rajah 10.

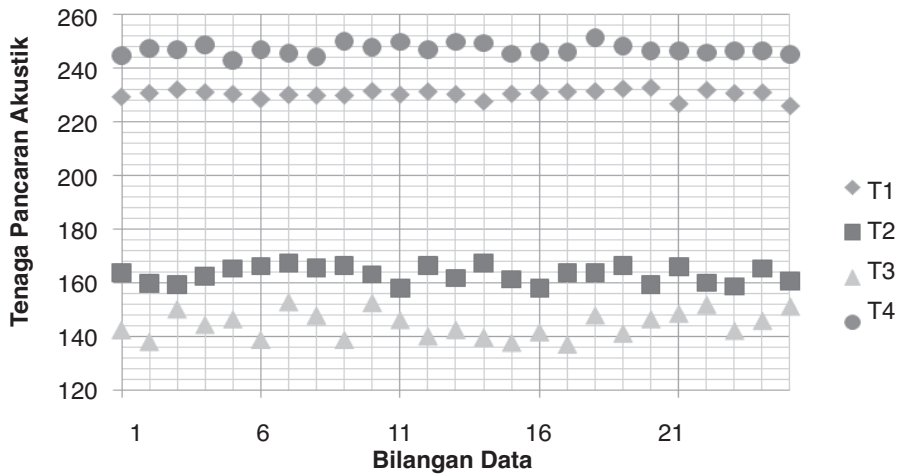


Rajah 8 Taburan amplitud pada setiap kedudukan penerima dengan 25 bilangan bacaan



Rajah 9 Taburan punca min kuasa dua pada setiap kedudukan penerima dengan 25 bilangan bacaan

Dengan menggunakan Persamaan (9), nilai tenaga pancaran akustik hasil kajian boleh dibandingkan dengan nilai tenaga pancaran akustik hasil teori. Nilai E_o yang digunakan dalam dalam Persamaan (9) adalah nilai tenaga pancaran akustik di T1 dan T4. Pemilihan nilai di T1 adalah merujuk kepada nilai tenaga pancaran akustik yang dirambat dalam pemantauan kelikatan minyak pelincir enjin diesel. Manakala T4 pula merujuk kepada tenaga pancaran akustik yang terhasil daripada tindak balas mampatan maksimum dan permulaan pembakaran [14]. Nilai faktor k secara teori adalah 0.00485, iaitu halaju gelombang tegasan media.

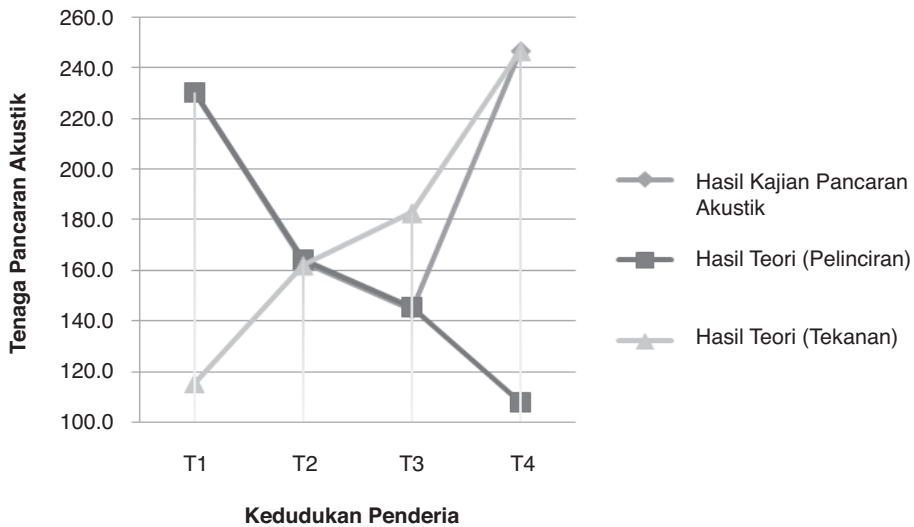


Rajah 10 Taburan tenaga pancaran akustik pada setiap kedudukan penderia dengan 25 bilangan bacaan

Dari hasil kajian pula nilai faktor k adalah 0.004921. Perbezaan nilai faktor k antara teori dan kajian terlalu kecil, iaitu 71×10^{-5} . Ini membuktikan bahawa faktor k hasil kajian hampir menyamai dengan halaju gelombang tegasan. Dengan itu, nilai tenaga pancaran akustik pada setiap kedudukan penderia sebenarnya bergantung kepada jarak antara kedudukan penderia dengan kedudukan sumber isyarat. Ini ditunjukkan dalam Jadual 2 dan Rajah 11 di mana nilai tenaga pancaran akustik T2 dan T3 menurun dengan T1 merupakan kedudukan sumber isyarat. Keadaan ini tidak berlaku sekiranya kedudukan sumber isyarat dirujuk kepada T4. Dengan kata lain, T1 merupakan lokasi terbaik dalam pemantauan kelikatan minyak pelincir enjin diesel. Kenyataan ini sebenarnya merujuk perilaku ombok di dalam silinder.

Jadual 2 Nilai tenaga pancaran akustik (milli Joule) pada setiap kedudukan penderia secara teori, iaitu pengiraan Persamaan (9)

Teori	Nilai E_0 Pada	T1	T2	T3	T4
Pelinciran	T1	230.2	163.9	145.2	107.5
Tekanan	T4	115.2	161.8	182.6	246.7



Rajah 11 Nilai tenaga pancaran akustik terhadap 4 kedudukan penderia melalui kajian teori dan kajian pancaran akustik

Semasa omboh berada di pusat mati bawah, hanya kambi omboh berada di hujung silinder. Sentuhan kambi omboh dengan silinder dilapisi dengan minyak pelincir yang mana kuantitinya, iaitu ketebalannya ditentukan melalui tahap lekat minyak tersebut. Tahap lekat yang dimaksudkan adalah kemampuan minyak pelincir tersebut melekat pada dinding silinder dan omboh yang bertujuan mengurangkan geseran yang terhasil semasa pergerakan omboh. Kemampuan melekat minyak pelincir merupakan sebahagian daripada ciri-ciri minyak pelincir. Tahap lekat minyak pelincir sebenarnya bergantung kepada tahap kelikatannya secara berkadar terus terutama sekali minyak pelincir berasaskan minyak mentah.

Ini bermaksud peningkatan kelikatan akan menyebabkan peningkatan tahap lekatnya dan sebaliknya. Ini sebenar disebabkan kadar alir minyak pelincir tersebut yang berbeza mengikut tahap kelikatannya [21, 22]. Kembali kepada keterangan di atas, kawasan bawah kambi semasa omboh berada di kedudukan pusat mati atas ianya merupakan kawasan semburan minyak pelincir [20] yang terhasil semasa pergerakan omboh dari pusat mati bawah ke pusat mati atas. Pada keadaan ini, rambatan isyarat di T1 hanya merambat isyarat yang terhasil dari tindak balas omboh ke atas silinder yang berlapiskan minyak pelincir seperti mana yang dinyatakan dalam Rajah 1 di atas. Pada lokasi ini, isyarat-isyarat pancaran akustik yang terjana dari sentuhan gegelang omboh terhadap silinder dan hasil isyarat semasa lejang mampatan serta lejang kuasa terlalu kecil.

4.2 Perbincangan

Kajian terhadap titik kedudukan penderia pancaran akustik untuk pemantauan kelikatan minyak pelincir enjin diesel telah membuktikan bahawa tenaga akustik mempunyai perhubungan dengan jarak penderia dari sumber isyarat. Melalui kaedah pancaran akustik, nilai kelikatan minyak pelincir boleh ditentukan melalui tenaga pancaran akustik. Minyak pelincir enjin disel berada dalam 2 regim pelinciran, iaitu sama ada dalam regim hidrodinamik dan regim elastik-hidrodinamik. Pelinciran pada bahagian ombok ianya merupakan pelinciran regim hidrodinamik. Dalam regim hidrodinamik, tenaga pancaran akustik penderia akan menurun apabila kelikatan menurun. Tenaga pancaran akustik penderia boleh dirumuskan sebagai Persamaan (11).

$$E_p = E_o e^{-(k_s \Delta t + k_m \frac{t}{T})} \quad (11)$$

dengan E_p adalah tenaga pancaran akustik penderia, E_o adalah tenaga pancaran akustik domain masa, k_s adalah faktor pengecilan oleh suhu, k_m adalah faktor pengecilan oleh masa guna, Δt adalah perbezaan suhu, t adalah usia penggunaan sama ada dalam bentuk masa atau pematuan dan T adalah nilai maksimum penggunaan minyak pelincir sama ada dalam bentuk masa atau pematuan.

Jika Rajah 11 dilihat semula, ianya membuktikan bahawa T1 merupakan kedudukan penderia terbaik untuk pemantauan kelikatan minyak pelincir enjin diesel. Manakala T4 merupakan kedudukan penderia terbaik untuk pemantauan mampatan dan juga dalam pemantauan perilaku enjin. Ini disebabkan oleh nilai daya geseran yang tinggi terhasil semasa ombok menghampiri PMA dan semasa permulaan lejang kuasa [21]. Selain itu di kedudukan ini, tenaga pancaran akustik yang terhasil merupakan tindak balas mampatan maksimum dan permulaan pembakaran seperti mana yang dinyatakan di atas [14]. Nilai mampatan untuk enjin diesel adalah tinggi yang bertujuan memampatkan udara agar ia menjadi panas sebelum semburan bahan api diesel untuk memulakan pembakaran.

Jika merujuk kembali keputusan kajian, kedudukan penderia di T3 yang merupakan titik di mana larian ombok dari PMB ke PMA adalah kedudukan penderia yang baik untuk pengukuran perilaku gegelang ombok dan ketebalan minyak pelincir pada gegelang ombok [8,12]. Rajah 11 juga menunjukkan nilai tenaga pancaran akustik pada T3, hampir menyamai nilai tenaga yang dihasilkan melalui teori atau persamaan (9) sekiranya T1 yang menjadi kedudukan pemantauan kelikatan sebagai nilai rujukan. Ini berbeza sekiranya nilai tenaga pancaran akustik di T4 digunakan sebagai

nilai rujukan. Pada T2 pula, nilai tenaga pancaran akustik hampir sama ada dari hasil kajian, teori isyarat pemantauan kelikatan, iaitu T1 dan teori isyarat pemantauan mampatan, iaitu T4. Ini disebabkan T2 merupakan kedudukan penerima di PMB dan pada kedudukan ini isyarat yang dirambat bercampur antara isyarat pemantauan tekanan dan isyarat pemantauan kelikatan pelincir [16, 23].

Kedudukan penerima yang paling baik untuk pemantauan kelikatan minyak pelincir enjin diesel adalah di T1. Terdapat 2 sebab utama kenapa T1 dikatakan lokasi yang paling baik untuk penempatan penerima semasa pemantauan kelikatan minyak pelincir enjin diesel.

- (a) Melalui hasil Persamaan (9), tenaga pancaran akustik menurun pada T2 dan T3 dan nilainya menghampir dengan nilai hasil kajian. Susutan tenaga pancaran akustik pada T2 dan T3 disebabkan oleh jarak dari sumber tenaga pancaran akustik itu sendiri.
- (b) Pada lokasi T1 hanya berlaku tindak balas gelangsar antara ombok dengan dinding silinder yang mana minyak pelincir pada masa itu bertindak sebagai pengantara. Manakala di T3, tindak balas gelangsar antara gegelang ombok bersama-sama ombok dengan dinding silinder. Tindak balas mampatan dan pembakaran pula akan berlaku di T4. Selain itu bukti ini diperkukuhkan lagi dengan perilaku sistem pelinciran enjin, yang mana kawasan yang memperolehi kuantiti minyak pelincir yang banyak adalah di titik T1 sama ada penghantarannya secara semburan atau simbahan ataupun gabungan kedua-dua kaedah [20, 21, 24].

Melihat pada Persamaan (10) ianya sesuai dalam pengukuran isyarat pancaran akustik semasa pemantauan perilaku gegelang ombok dan pembakaran, iaitu lokasi penerima di T3 dan T4. Jika dilihat semula kepada keputusan kajian Persamaan (9) telah membuktikan bahawa tenaga pancaran akustik mengecil bergantung kepada jarak penerima dari pusat sumber isyarat dengan mengambil kira faktor $k = 0.004921$ daripada hasil kajian [23] yang hampir menyamai dengan halaju gelombang tegasan yang terhasil pada dalam sesuatu bahan.

5.0 KESIMPULAN

Merujuk kepada keputusan dan perbincangan di atas, kedudukan T1 adalah kedudukan penerima yang paling baik untuk pemantauan kelikatan minyak pelincir melalui teknik pancaran akustik. Isyarat pancaran akustik yang dianalisis dari kedudukan T1 lebih konsisten daripada kedudukan lain. Persamaan (9) pula membantu membuktikan bahawa kedudukan

T1 merupakan sumber isyarat utama yang dijana daripada tindak balas omboh ke atas minyak pelincir. Pada Persamaan (10), andaian tenaga hanya melibatkan omboh dalam larian lejang, di mana sudut θ merujuk kepada kedudukan omboh pada lejang.

Jika dilihat kedudukan T1, iaitu berada di bawah PMB ini bermakna tenaga pancaran akustik yang dibebaskan merupakan tenaga yang terhasil daripada tegasan yang dialami oleh minyak pelincir semasa pergerakan omboh. Gangguan isyarat di T1 adalah gangguan isyarat yang minimum kerana pada kedudukan tersebut, sentuhan gegelang omboh dengan pelapik silinder tidak akan menghampiri di lokasi T1. Selain itu kesan semasa lejang tekanan dan kuasa terlalu kecil diterima oleh penderia di T1. Dengan kejayaan kajian ini, ianya bakal memudahkan lagi kajian pemantauan kelikatan minyak pelincir dengan kaedah pancaran akustik kerana titik kedudukan yang paling sesuai untuk penderia telah ditemui. Ini disebabkan oleh isyarat yang terjana lebih konsisten dan memudahkan pembacaan parameter.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada Universiti Malaysia Perlis dan Kementerian Pengajian Tinggi yang menaja pengajian peringkat PhD.

RUJUKAN

- [1] Reuben, R. L. 1998. The Role of Acoustic Emission in Industrial Condition Monitoring. *International Journal of COMADEM*. 1: 35-46.
- [2] Fog, T. L., E. R. Brown, H. S. Hansen, L. B. Madsen, P. S. Rensen, J. A. Steel, R. L. Reuben dan P. S. Pedersen. 1998. Exhaust Valve Leakage Detection in Large Engine Diesel. *Proceedings of the 11th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management COMADAM*. 1: 269-278.
- [3] Gill, J. D., R. L. Reuben dan J. A. Steel. 2000. A Study of Small HSDI Diesel Engine Fuel Injection Equipment Faults Using Acoustic Emission. *Proc. EWGAE*. 281-286.
- [4] El-Ghamry, M. H., R. L. Reuben, dan J. A. Steel. 2003. The Development of Automated Pattern Recognition and Statistical Feature Isolation Techniques for the Diagnosis of Reciprocating Machinery Faults Using Acoustic Emission. *Mechanical Systems and Signal Processing Journal*. 17: 805-823.
- [5] Miller, R. K. dan P. McIntire. 1987. *Non-Destructive Testing Handbook*. Vol. 5. Columbus, OH: The American Society for Nondestructive Testing.
- [6] Kolsky, H. 1963. *Stress Waves in Solids*. New York: Dover Publications.
- [7] Pollock, A. A. 1986. Classical Wave Theory in Practical AE Testing. *Proc. JAP Society of Non-Destructive Testing*. 708-721.
- [8] Nivesrangsan, P., J. A. Steel dan R. L. Reuben. 2005. AE Mapping of Engines for Spatially Located Time Series. *Mechanical Systems and Signal Processing Journal*. 19: 1034-1054.

- [9] Nivesrangan, P., J. A. Steel dan R. L. Reuben. 2007. Acoustic Emission Mapping of Diesel Engines for Spatially Located Time Series – Part 11: Spatial Reconstitution. *Mechanical Systems and Signal Processing Journal*. 21: 1084-1102.
- [10] Nivesrangan, P., J. A. Steel dan R. L. Reuben. 2007. Source Location of Acoustic Emission in Diesel Engines. *Mechanical Systems and Signal Processing Journal*. 21: 1103-1114.
- [11] El-Ghamry, M. H., E. Brown, I. G. Ferguson, J. D. Gill, R. L. Reuben, J. A. Steel, M. Scaife dan S. Middleton. 1998. Gaseous Air-Fuel Quality Identification for a Spark Ignition Gas Engine Using Acoustic Emission Analysis. *Proceedings of COMADEM*. 235-244.
- [12] Friss-Hausen, A. dan T. L. Fog. 2001. Monitoring Exhaust Valve Leaks and Misfire in Marine Diesel Engines. *Proceedings of COMADEM*. 641-648.
- [13] Steel, J. A. dan R. L. Reuben. 2005. Recent Development in Monitoring of Engines Using Acoustic Emission. *Journal of Strain Analysis For Engineering Design*. 40: 45-57.
- [14] El-Ghamry, M. H., R. L. Reuben, J. A. Steel dan T. L. Fog. 2005. Indirect Measurement of Cylinder Pressure from Diesel Engines Using Acoustic Emission. *Mechanical Systems and Signal Processing Journal*. 19(4): 751-765.
- [15] Achenbech, J. D. 1973. *Wave Propagation in Elastic Solids*. Netherlands: North Holland Publisher Company.
- [16] Beattie, A. G. 1983. Acoustic Emission Principles and Instrumentation. *Journal of Acoustic Emission*. 2: 95-123.
- [17] Jiaa, C. L. dan D. A. Dornfeld. 1990. Experimental Study of Sliding Friction and Wear via Acoustic Emission Signal Analysis. *Wear Journal*. 39: 403-424.
- [18] Hardy, H. R. J. 2003. *Acoustic Emission/Microseismic Activity Vol. 1*. Lisse: A. A. Balkema Publishers
- [19] Douglas, R. M., J. A. Steel dan R. L. Reuben. 2006. A Study of the Tribological Behaviour of Piston Ring/Cylinder Liner Interaction in Diesel Engines Using Acoustic Emission. *Tribology International Journal* 39: 1634-1642.
- [20] Pirro, D. M. dan A. A. Wessol. 2001. *Lubrication Fundamentals*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [21] Pulkrabek, W. W. 2004. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. 2nd ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- [22] Haq, A. N. dan T. Tamizharasan. 2007. **Ring Wear Monitoring in IC Engines: An Acoustic Emission Approach**. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 31: 1148-1155.
- [23] Othman Inayatullah, Mohd Jailani Mohd Nor, Nordin Jamaludin, Taib Iskandar Mohamad, Fadzul Rahimi Ahmad Bustami, Fauziah Mat dan Mazian Mohammad. 2007. Pemantauan Kelikatan Minyak Pelincir Melalui Teknik Pancaran Akustik – Implikasi Kedudukan Sensor. *Proceedings of Regional Conference on Engineering Mathematics, Mechanics, Manufacturing & Architecture EM³ARC*. 45-56.
- [24] Crouse, W. H. dan D. L. Anglin. 1993. *Automotive Mechanics*. 10th ed. Singapore: McGraw Hill.