

Effect of PWHT on Variability of Fatigue Crack Propagation Resistance in TIG Welded Al6013-T4 Aluminum Alloy

Pengaruh PWHT Terhadap Keragaman Ketahanan Perambatan Retak Fatik Logam Paduan Al 6013-T4 Yang Telah Mengalami Proses Pengelasan TIG

Gunawan Dwi Haryadi¹ dan A.P. Bayuseno¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH Tembalang, Semarang, 50275
E-mail:gunawan_dh@undip.ac.id

Abstract

This paper shows the influences of post weld heat treatment (PWHT) of artificial aging time in longitudinal butt welded Al 6013-T4 aluminum alloy on the fatigue crack growth resistance. The preferred welding processes for this alloy are frequently tungsten inert gas welding (TIG) process due to its comparatively easier applicability and better weldability than other gas metal arc welding. Fatigue crack growth tests were carried out on compact tension specimens (CT) in longitudinal butt TIG welded after T82 heat treatment was varied in three artificial aging times of 6 hours, 18 hours and 24 hours. Of the three artificial aging times, 24 hours of artificial aging time are offering better resistance against the growing fatigue cracks. The superior fatigue crack growth resistance preferred spatial variation of materials within each specimen in the Paris equation based on reliability theory and fatigue crack growth rate by crack length are found to be the reasons for superior fatigue resistance of 24 hours of artificial aging time was compared to other joints. The highest of crack propagation resistance occurs in artificial aging times of 24 hours due to the increase in grain size.

Keywords: fatigue crack propagation, artificial aging time, tungsten inert gas welding, reliability model, variability of fatigue crack propagation resistance

INTRODUCTION

Aluminum alloys are widely used as aerospace materials and automotive materials related to fatigue damage. Aluminum alloy with the addition of alloy elements consisting of Mg and Si, and Mn, Cr, Ti, Cu can improve the mechanical strength and tensile strength, Al-Mg-Si is a luminum 6000 series, has the properties of light weight, high yield strength, workability, formability, good corrosion resistance as aerospace and automotive body materials are widely recognized [1].

In all cases, welding is the primary joining method and fatigue is a major design criterion. However, as is well known, welded joints can exhibit low fatigue properties. Thus, clear design guidelines are needed to ensure that fatigue failures are avoided in welded aluminum alloy structures. Apart from basic design of new structures, there is also increasing interest in methods for assessing the remaining lives of existing structures [2].

In all cases, welding is the primary joining method and fatigue is a major design criterion. However, as is well known, welded joints can exhibit low fatigue

properties. Thus, clear design guidelines are needed to ensure that fatigue failures are avoided in welded aluminum alloy structures. Apart from basic design of new structures, there is also increasing interest in methods for assessing the remaining lives of existing structures [2].

Prompted by difficulties experienced in reaching a consensus on fatigue performance of welded aluminum alloy have been undertaken over the past few years. Analysis and extensive testing on Fatigue properties of welded joints Aluminum, many researchers have studied by the last decade [3].

TIG welding process is one of the most well established processes which can not only weld all metals of industrial use but produces the best quality welds amongst the arc welding processes, because of advantages such as lower prices, in particular, the easy and precise control of welding parameters. Unfortunately, almost all the heat treatment of aluminum alloys, if it appears that a lot of hot cracking. The main problem in welding these alloys is welding cracking (solidification cracking) in the weld, and the heat treatment can be improved. At this time the aging time

and temperature are important variables. Thus, by heat treatment after welding is very important to investigate the fatigue crack propagation behavior in terms of welded damage tolerance design [4].

Fatigue test are widely used to characterize the behaviour of materials, though they tend to be more used for sample testing of uniform material. To determine the fatigue tendency of welded joint, the study and control of the tests is more complex, as welded joints present microstructural variations over small distance, not to mention complex distributions of residual stresses. A more detailed study of the fatigue behaviour of welded joints is necessary as it provides data for determining the resistance structures [5].

Failure analysis of the weldedment indicated that fatigue alone is to be considered to account for most of the disruptive failures. Even though the failure properties of the weld metal is good, problems can occur when there is an abrupt change in section which is caused by excess weld reinforcement, undercut, slag inclusion, and lack of penetration, and nearly 70 % of fatigue cracking occurs in the welded joint. [6].

In this study reports the influence of post weld heat treatment (PWHT) on fatigue crack growth resistance of TIG welded AL 6013-T4 aluminum alloy. Among them, artificial aging time is differently performed to heat treatment on 6 hours, 18 hours, and 24 hours. Based on reliability theory, according to the crack length and the spatial variability of the material fatigue crack propagation rate comparisons were investigated.

Materials and Experimental Methods

Specimen materials used in this study, Al 6013-T4 aluminum alloy sheet as a test specimen length direction of the 500×250 mm plate was carried out heat treatment-T82 after longitudinal TIG weld. Different treated artificial aging time, were carried out by 6 hours, 18 hours and 24 hours for CT specimens according to ASTM E647 standard fatigue tests. The shape and dimension of CT specimen used in this study are shown in Fig. 1. And the chemical composition and mechanical properties of Al 6013-T4 are shown in Table 1 and Table 2, respectively.

Table 1. Chemical composition (wt. %).

Material	Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Cr	Ti	Zn
6013-T4	1.0	0.8	0.9	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1

Fig. 2 shows for each the T82 solution treatment and artificial aging time, respectively. The welding conditions for TIG welding was carried out the rolling direction using the Al 5356 filler with 3.2

mm diameter can be seen in Table 3 .

Table 2. Mechanical properties of the specimen.

Material	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
Al 6013-T4 (BM)	346	243	19.42
Al 6013-T82 / 6h	117	93	9.46
Al 6013-T82 / 18h	224	115	13.96
Al 6013-T82 / 24h	195	113	11.97

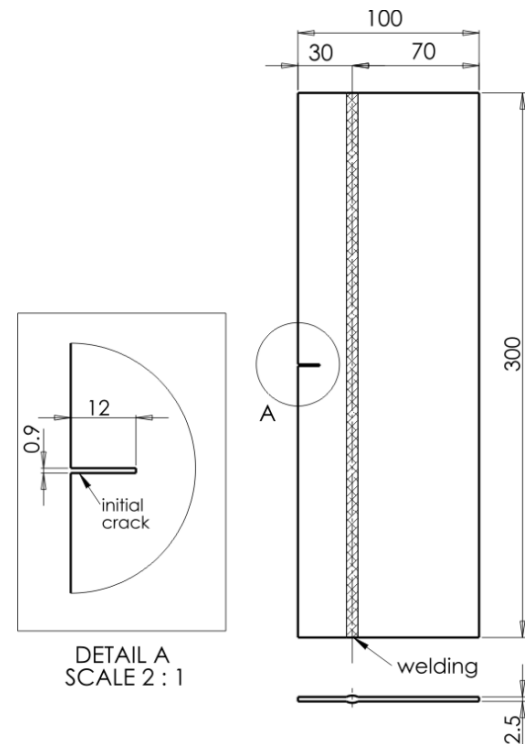


Fig. 1. Shape of CT specimen and dimension.

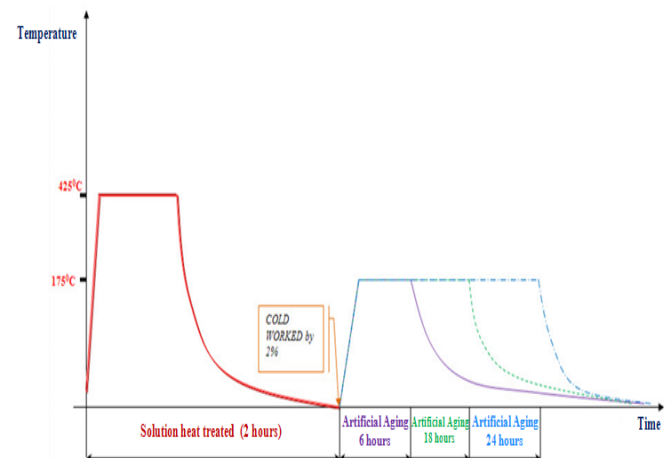


Fig. 2. Solution heat treated and artificial aging time.

The fatigue crack growth experiments were conducted using a close loop servo-hydraulic fatigue testing machine (Shimadzu) at room temperature. All

test were carried out in a sinusoidal tension-tension under constant amplitude loading control mode for controlled loading range (ΔP) 980 N, the stress ratio (R) 0.3, and the frequency 5-11Hz. Conditions that was observed for each treatment and artificial aging 3 per prescription, for a total of 12 specimens. The measurement of crack length was measured using a travelling microscope, the equation of ASTM E647 were used by the crack tip stress intensity factor. The initial crack length $a = 15$ mm to 54.5 mm including from pre-crack intervals in 0.5mm cracks were treated by normalization.

Table 3. TIG welding conditions and parameters.

Parameter	values
Welding machine	Miller
Tungsten electrode diameter	3.0 mm
Filler rod/wire diameter	3.2 mm
Heat input	2.5 kJ/mm
Peak current	70 Amps
Base current	60 Amps
Peak voltage	15 Volts
Base voltage	10 Volts
Welding Speed	2.5 mm/sec
Welding grade	99.95%
Melting point	543 ⁰ C-640 ⁰ C
Pulse frequency	6 Hz
Pulse on time	50 %
Shielding gas	argon
Gas flow rate	15 lit/min

Results and Discussion

Fig. 3, three specimens and base metal parts to artificial aging treated by three each differently, total of 12 specimens shows a relationship between in the number of cycles N and crack length for the stress. As shown in this figure that fatigue crack growth are differently indicated by artificial aging time in such a post weld heat treatment of T82, fatigue crack propagation resistance is 24 hours of artificial aging time greater than 6, 18 hours artificial aging time in order. In case of base metal were indicated softly curve shape by stress-number of cycles in crack propagation, but other data of 3 types in such cases were indicated irregular results at nearby 30 mm of crack length.

However, there is a variation of the specimen within the curve of the form is showing. On the other hand, randomness of a - N curve for each 3 specimens by same condition was known less than other structure steel materials. It is thought that crack propagation is due to passed through heat affected zone, weld fusion zone, and weld metal on nearby 30 mm of crack length. It is mean that specimen to specimen variation is low and it is considered that the variation within each

specimen is some existed for fatigue crack propagation rate.

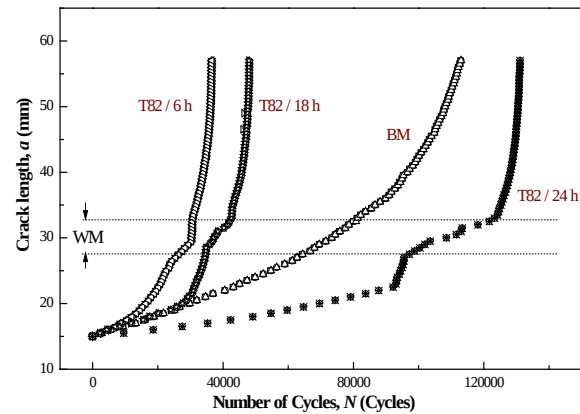


Fig.3. Crack length a vs. number of cycle N .

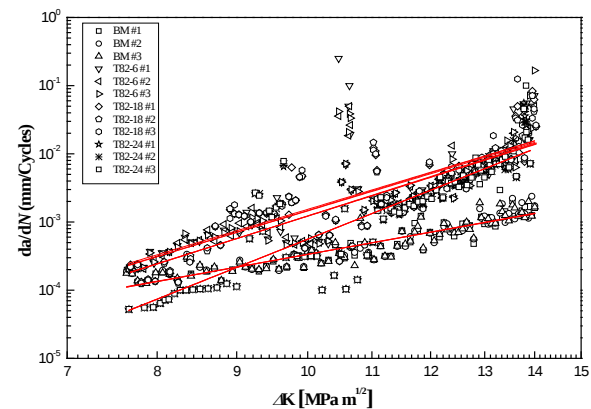


Fig. 4. Fatigue crack growth rate da/dN vs. SIF range ΔK

Fig. 4 shows the relation between fatigue crack propagation rate and stress intensity factor range. A figure represents for each solid line of 12 specimens obtained using least squares regression.

In the actual practice, the regression line will be interpreted that all data. That data mean the fatigue crack propagation on weld metal delay and then acceleration phenomenon. The regression line is not in the actual welding, on the actual welds to be included by adding a non-linear. In the following, using the data based on reliability theory, the volatility of fatigue crack propagation is investigated.

Based on fracture mechanics to assess the fatigue crack propagation behavior has many different expressions, but the most widely used was based on the following Paris equation.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

Where

da/dN is the fatigue crack propagation rate and ΔK is stress intensity factor range (SIF), “ C ” and “ m ” are the material constants. To be random

variable methods of fatigue crack propagation based on reliability theory can be largely split in three parts. First is the specimen-to-specimen variation, second is the variation within each specimen, and third is specimen-to-specimen variation and the variation within each specimen at the same time. In other words, the existing material constant C of the Paris-Erdogan equation is modeled as follows.

$$C(a) = \frac{C_1}{C_2(a)} \quad (2)$$

Where a represents position (crack length) in the crack tip, C_1 is a positive random variable describing the deviation between the behavior of different specimens, and C_2 is random process modeling the deviation of the crack propagation rate within each specimen.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_1}{C_2(a)} (\Delta K)^m \quad (3)$$

In this case, variation of crack propagation represents within each specimen if C_1 and m has fixed. Spatial variation of material is possible to treat the fatigue crack propagation model process. The variation of C_2 by crack length for each specimen of artificial aging times on base metal, 6 hours, 18 hours and 24 hours are shown in Fig. 5-8.

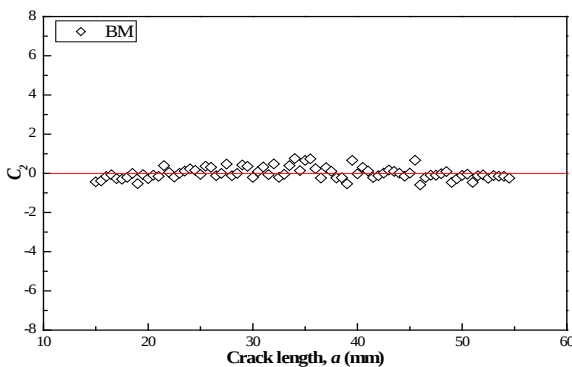


Fig. 5. Variation of C_2 base material.

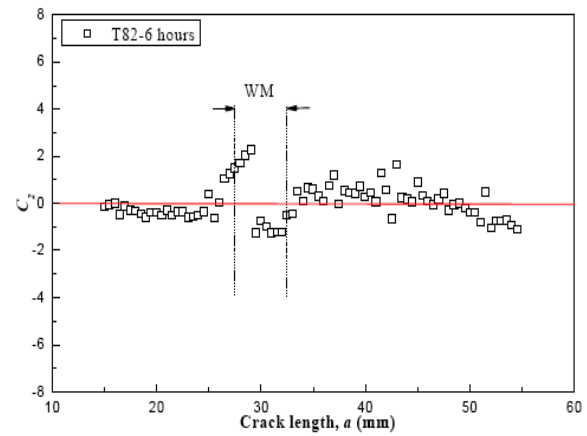


Fig. 6. Variation of C_2 T82-6 hours.

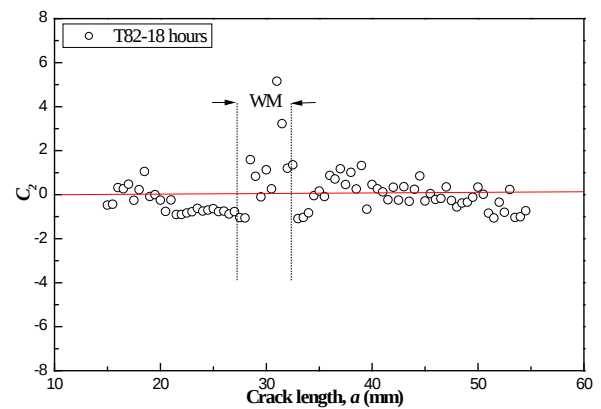
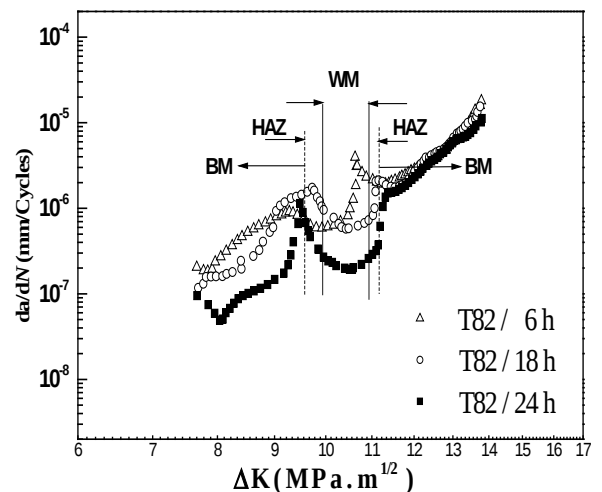


Fig. 7 Variation of C_2 T82-18 hours.



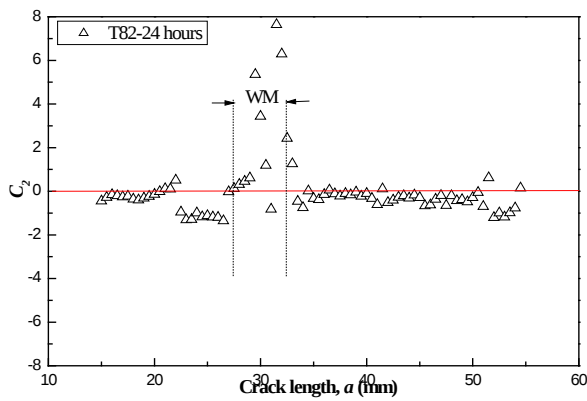


Fig. 8 Variation of C_2 T82-24hours.

Fig. 9. Fatigue crack growth rate da/dN vs. SIF range ΔK .

Appears on the picture, a result of investigation in variation of C_2 by crack length were represented that 24 hours specimens of artificial aging time is the most greatest in its variation. Meanwhile, the C_2 of the fluctuations around the weld metal of artificial aging tendency to increase with time, crack growth delay means to improve effectiveness.

It indicated that the crack delay is appears due to the influence of PWHT. The relationship between the fatigue crack propagation rate and stress intensity factor range for the average of an artificial aging time test specimen is shown in Fig. 9.

The greater the value of C_2 will be the greater tendency of the value of the fatigue crack propagation rate. The value of C_2 describes the properties of material experiencing fatigue crack propagation. If there is change the value of C_2 of a material, the material tends to have a proficiency level properties of the non-homogeneous materials.

The value of C_2 is increased in the HAZ and welded metal region. It is explains that changes the properties of different materials and occurs delayed fatigue crack propagation (shown in Figure 9). After crack propagation occurs in the weld metal into the HAZ region, the value of C_2 decreases, and the fatigue crack propagation increased again until the base metal region. This phenomenon occurs in PWHT specimens 6, 18 and 24 hours of aging.

For the largest value of crack retardation of C_2 size is the most significant occurred to the specimen for 24 hours artificial aging time but stress intensity factor 9 MPa (m)^{1/2} in 18 hours, the propagation rate was lowest, followed by 24 hours, and 6 hours. However, the cracking delayed recovery a high relatively after the area in 13 MPa (m)^{1/2}. Fatigue crack propagation rate was almost similar. This aging

treatment time and the influence of welding residual stresses are considered.

Optical micrographs of base metal, HAZ, Fusion zone and weld metal are shown in Fig. 10. The microstructure of the as welded Al 6013 T4 and PWHT Al 6013 T82 alloys showed primarily two phases, i.e. aluminum solid solution (light etched) and Mg_2Si phases and other low melting phases along the grain boundary (dark etched). This suggests that the PWHT-T82 is effective in fusion zone grain refinement. From the micrographs, it is understood that there is an appreciable different in grain size (average grain diameter) of base metal, HAZ, fusion zone and weld metal. Kang and Liu observed that the magnesium content in the alloys greatly influences the as-cast microstructure.

Higher the magnesium content greater relative amount of Mg_2Si phase in Al-Mg-Si alloys. In the high magnesium alloys, not only binary eutectic structure, but also ternary eutectic structure formed.

The measured average grain diameter of base metal is 70 μm , but the average grain diameter of PWHT-T82 for aging of 6 hours is 30 μm and this indicates that reduction in grain diameter is 40 μm due to PWHT-T82 for 6 hours aging process. Similarly the measured average grain diameter of PWHT-T82 for 18 hours aging is 15 μm but the average grain diameter of PWHT-T82 for 24 hours aging is 50 μm , and this also pointing that the increasing in grain diameter is 35 μm due to PWHT-T82 for 24 hours of aging process.

In the heat affected zone, the measured average grain diameter of HAZ of as welded is 90 μm , but the average grain diameter of PWHT-T82 for 6 hours aging is 60 μm and this indicates that reduction in grain diameter is 30 μm due to PWHT-T82 for 6 hours of aging process. Similarly the measured average grain diameter of PWHT-T82 for 18 hours aging is 25 μm but the average grain diameter of PWHT-T82 for 24 hours aging is 40 μm , and this also pointing that the increasing in grain diameter is 15 μm due to PWHT-T82 for 24 hours of aging process.

In the weld metal region, the measured average grain diameter of weld metal without heat treatment is 150 μm , but the average grain diameter of PWHT-T82 aging of 6 hours is 70 μm and this indicates that reduction in grain diameter is 80 μm due to PWHT-T82 for 6 hours of aging process. Similarly the measured average grain diameter of PWHT-T82 for 18 hours aging is 10 μm but the average grain diameter of PWHT-T82 for 24 hours of aging is 60 μm , and this also pointing that the increasing in grain diameter is 50 μm due to PWHT-T82 for 24 hours of aging process.

As can be seen in Fig. 10, the average grain diameter in the fusion zone region of PWHT-T82 for 24 hours aging is in the order of 30 μm and the grain size is much coarser in the fusion zone region of PWHT-T82 for 6 and 24 hours aging. The fine grained

microstructures relatively contain higher amount of grain boundary areas than coarse grained microstructure and in turn offer more resistance to fatigue crack propagation and this may be the reason for improved fatigue performance of PWHT-T82 for 24 hours aging compared to PWHT-T82 for 6 and 18 hours aging.

The changes in fatigue crack propagation occur because of differences in grain size. Fatigue crack propagation in metal base is almost similar to the material that has been carried out artificial aging. Fatigue crack propagation began changed after passing through the HAZ, and acceleration propagation has slowed. After passing through the WM region, rapid crack propagation began. This is due to the average grain diameter in the HAZ is relatively higher and fine so that the fatigue crack propagation delayed. Fatigue crack propagation largest delayed occurred in the material with artificial aging 24 hours, because the grain size is relatively large and fine grained compared to artificial aging 6 hours and 18 hours.

The changes in grain-T82 PWHT could potentially change the value of C_2 . The value of C_2 increases due to the form of fine grains; this can be seen in changes in the welded metal grains in the PWHT T82. The changes the value of C_2 is significantly occurred in

largest grain size on metal welded PWHT-T82 at 24 hours aging, compared with the size grains of 6 hours and 18 hours of aging.

On fatigue crack propagation testing with PWHT-T82 and variations aging decreased fatigue strength, as compared with Base Metal and as welded specimens. Decrease in fatigue strength is due to changes in micro structure (structure which increasingly coarse grains) as a result of the heat effect on the process of welding and tensile residual stress in the perpendicular direction.

Conclusion

In this study, the influence of post weld heat treatment on fatigue crack propagation behavior of TIG welded Al 6013-T4 aluminum alloy was investigated, from this study are derived that 24 hours of artificial aging time are offering better resistance against fatigue cracks propagation.

Fine grained microstructures relatively contain higher amount of grain boundary areas than coarse grained microstructure and in turn offer more increase to fatigue crack propagation and this may be the reason for improved fatigue performance of PWHT-T82 of artificial aging 24 hours.

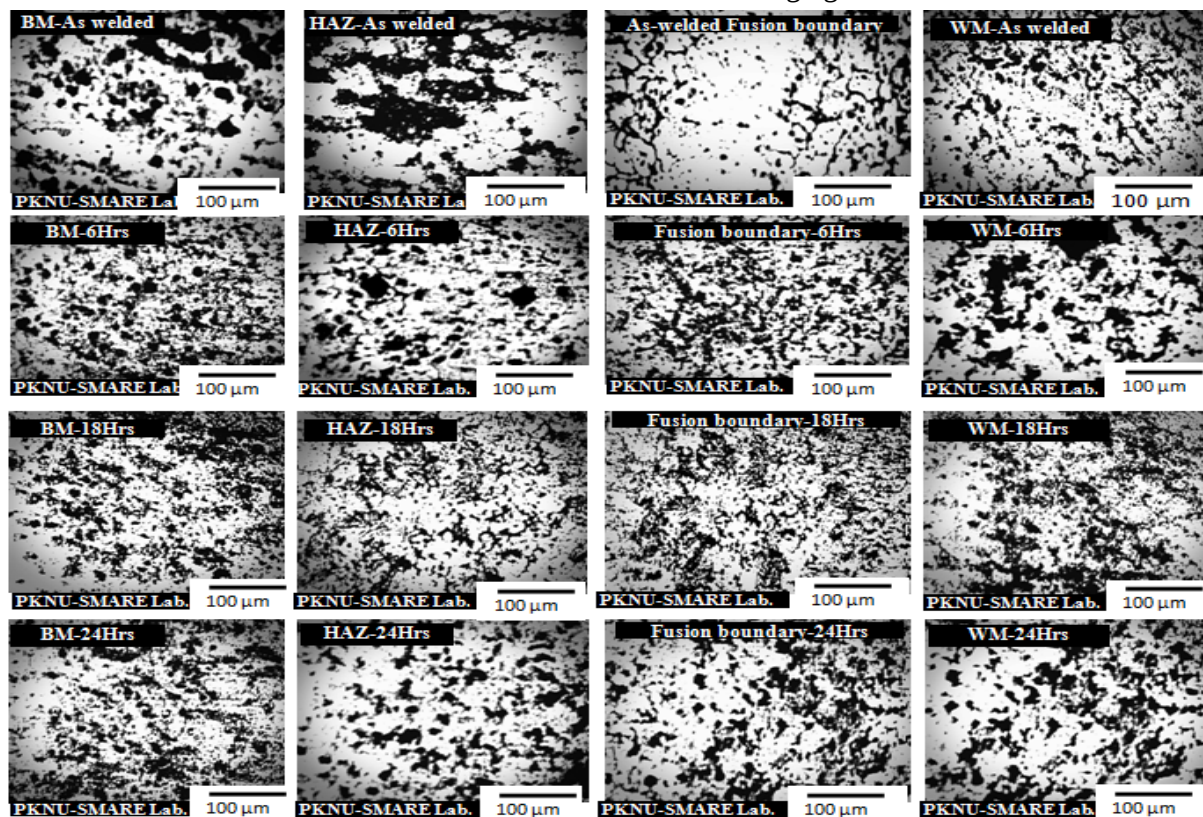


Fig. 10. Optical micrograph of As-welded Al 6013 T4 and PWHT-T82 specimens for variety of aging.

PWHT-T82 on 24-hour aging. This is due to the

References

- [1] Y. Birol, 2004, Improvement in Bake Hardening Response of a Twin-roll Cast Al-Mg-Si Sheet, International Conference on Aluminum 2004, Subodh K. Das, Ed., The Minerals, Metals & Materials Society, TMS.
- [2] Yakubovski V.V. and Valteris J. J., 1989, "Geometrical Parameters of Butt and Fillet Welded and Their Influence on The Welded Joint Fatigue Life", In: IIW Doc. No. XIII, pp. 1326-69.
- [3] Maddox S. J., 2003, "Review of Fatigue Assessment Procedures for Welded Aluminum Structures", Int. J. Fatigue, pp 1359-78.
- [4] AWS, 1991, "Welding Handbook", Vol. 2, 8th Ed., pp. 74-75.
- [5] Wang C. and Chang Y., 1996, "Effect of Post-Weld Treatment on the Fatigue Crack Growth Rate of Electron Beam-Welded AISI 4130 Steel", Trans. Of Metallurgical and Material, Vol. 27A, pp. 3162-3169.
- [6] S. Malarvizhi, K. Raghukandan, N. Viswanathan, 2008, "Investigations on the Influence of Post Weld Heat Treatment on Fatigue Crack Growth Behaviour of Electron Beam Welded AA2219 alloy", Int. J. Fatigue, Vol. 30, pp. 1543-1555.
- [7] Y. L. Liu and S. B. Kang, 1997, "The solidification process of Al-Mg-Si alloys", J. Mater. Sci., Vol. 32, pp. 1443-1447.
- [8] G. E. Dieter, 1988, "Mechanical Metallurgy", 2nd ed., McGraw-Hill.
- [9] Fuchs H. O. and Stephens R. I, 1980, "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Son, New York.
- [10] J. C. Huang, C. S. Shin, and S. L. I. Chan, 2004, "Effect of temper specimen orientation and test temperature on tensile and fatigue properties of wrought and PM AA6061-alloys", International Journal of Fatigue, Vol. 26, pp. 691-703.
- [11] Donnelly E., Nelson D., 2002, "A study of small crack growth in aluminium alloy 7075-T6", International Journal of Fatigue", Vol. 24, pp. 1175-89.
- [12] F. Bergner, G. Zouhar, G. Tempus, 2001, "The material-dependent variability of fatigue crack growth rates of aluminum alloys in the Paris regime", International Journal of Fatigue, Vol. 23, pp. 383-394.
- [13] Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, "ASTM E 647-08", 2008, American Society for Testing Materials (ASTM), New York.
- [14] V. Balasubramanian, V. Ravisankar, and G. Madhusudhan Reddy, 2008, "Effect of postweld aging treatment on fatigue behavior of pulsed current welded AA7075 aluminum alloy joints", ASM International, Vol. 17, pp. 224-233.

Karakteristik Pembakaran Mesin Diesel Injeksi Tak-Langsung Menggunakan Bahan Bakar Biodiesel

Ainul Ghurri

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Udayana
Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali 80362
a.ghurri@me.unud.ac.id

Abstrak

Sebuah pengujian eksperimental telah dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik pembakaran (*combustion characteristics*) mesin diesel injeksi tak-langsung (*indirect injection diesel engine*) menggunakan bahan bakar diesel murni (D100) dan campuran diesel-biodiesel dengan komposisi BD25, BD45 dan BD65. Mesin diesel dioperasikan dengan beban bervariasi pada kecepatan putaran konstan dari 1000 sampai 2400 rpm dengan interval 200 rpm. Pada tiap kecepatan putaran mesin yang diuji, torsi maksimum untuk tiap bahan bakar dicatat. Data kecepatan putaran mesin, torsi, posisi poros engkol dan tekanan silinder dicatat secara simultan ke dalam komputer yang terhubung dengan dinamometer mesin diesel yang diuji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kandungan biodiesel menurunkan daya mesin. Hal ini disebabkan oleh LHV biodiesel yang lebih rendah daripada bahan bakar diesel. Proses pembakaran biodiesel di dalam silinder diduga juga lebih buruk akibat densitas biodiesel yang lebih besar. Meski demikian, penurunan daya mesin akibat LHV biodiesel yang lebih rendah tidaklah sebesar perbedaan LHV antara diesel dan biodiesel. Hal ini bisa jadi merupakan efek dari sifat *lubricity* yang lebih baik pada biodiesel. Tekanan maksimum dalam silinder dan laju pelepasan panas dalam silinder D100 sedikit lebih tinggi dibanding biodiesel. Biodiesel menunjukkan laju perubahan tekanan yang lebih besar sesaat sebelum tekanan maksimum dalam ruang bakar. Hal ini diduga merupakan dampak kandungan oksigen dalam biodiesel yang lebih tinggi dan memperbaiki proses pembakaran pada periode utama pembakaran. Analisis terhadap proses pembakaran menunjukkan bahwa pembakaran biodiesel dimulai lebih awal daripada bahan bakar diesel sebagai efek dari viskositas yang lebih tinggi sehingga mengakibatkan peningkatan tekanan yang lebih cepat untuk mencapai tekanan bukaan nosel injektor. Sebaliknya, pembakaran biodiesel berakhir lebih lama daripada diesel murni yang diduga disebabkan oleh pembakaran yang kurang sempurna pada bahan bakar biodiesel. Hal ini berarti bahwa durasi pembakaran biodiesel berjalan lebih lama daripada bahan bakar diesel yang merupakan kondisi kurang menguntungkan. Diduga hal ini disebabkan oleh densitas biodiesel yang lebih tinggi mengakibatkan bukaan nosel injektor lebih awal; dan pada sisi lainnya mengakibatkan atomisasi yang lebih buruk dan pencampuran udara-bahan bakar yang lebih lambat.

Keywords: mesin diesel, biodiesel, karakteristik pembakaran

Pendahuluan

Prospek penggunaan biodiesel untuk mengganti bahan bakar fosil telah mendapat perhatian sejak beberapa dekade yang lalu. Istilah biodiesel umumnya diartikan sebagai *fatty acid methyl* atau *ethyl esters* yang berasal dari minyak nabati atau lemak hewan, yang memiliki sifat-sifat yang sesuai dengan mesin diesel (Demirbas, 2008). Banyak laporan telah dipublikasikan tentang efek biodiesel terhadap kinerja mesin diesel. Hasil-hasil penelitian tersebut sangat bervariasi, bahkan kadang bertolak belakang. Sebagian besar laporan menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel menurunkan daya mesin, namun Altiparmar et.al (2007) melaporkan kenaikan daya dan torsi ketika menggunakan campuran 70% biodiesel. Lapuerta et.al (2008) telah melakukan *review* secara masif tentang efek biodiesel terhadap

emisi gas buang mesin diesel termasuk di dalamnya *review* singkat tentang kinerja mesin. Dan dilaporkan bahwa terdapat hasil yang bervariasi dalam hasil-hasil penelitian biodiesel baik emisi maupun kinerja mesin dieselnnya. LHV biodiesel yang lebih rendah dibanding bahan bakar diesel telah mendapat perhatian besar dalam analisis kinerja mesin. Enweremadu & Rutto (2010) melakukan *review* tentang efek biodiesel dari bahan minyak goreng bekas. Xue et.al (2011) juga melakukan *review* publikasi-publikasi tentang biodiesel, dan masih melaporkan tren yang berbeda-beda tentang kinerja mesin dan emisi dikarenakan mesin uji yang beda, kondisi operasi yang berbeda, dan perbedaan spesifikasi biodiesel dan acuan bahan bakar dieselnnya, termasuk juga perbedaan instrumen pengujiannya. Perbandingan hasil pengujian terhadap *review* seperti yang telah disebutkan memberi pandangan yang

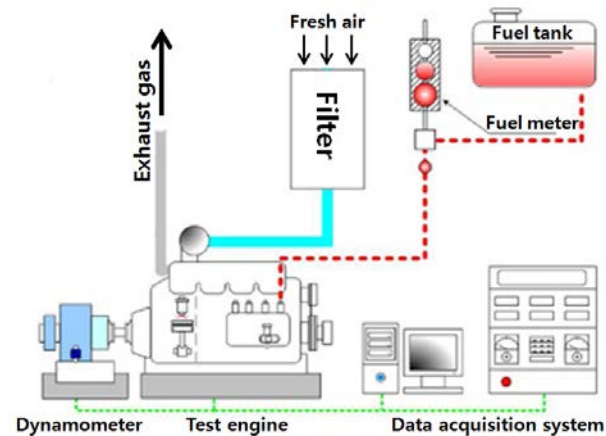
sangat penting tentang peran sifat bahan bakar terhadap karakteristik performansi mesin dan emisi gas buangnya.

Dalam makalah ini, campuran bahan bakar diesel dan biodiesel terbuat dari minyak kedelai diuji dalam mesin diesel injeksi tak-langsung. Pembahasan lebih ditekankan pada topik karakteristik pembakaran dalam silinder mesin.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Pengujian dilakukan menggunakan mesin diesel injeksi tak-langsung 4 langkah dengan 3 silinder. Skematik fasilitas eksperimental ditunjukkan dalam Gambar 1. Spesifikasi mesin yang diuji dijabarkan dalam Tabel 1. Mesin diuji dengan beban bervariasi, menggunakan bahan bakar diesel dan biodiesel pada kecepatan putaran konstan dari 1000 sampai 2400 rpm dengan interval 200 rpm. Pada tiap kecepatan uji, torsi maksimum mesin dicatat. Mesin diesel terhubung dengan *engine dynamometer*. Kecepatan putaran mesin, torsi, posisi poros engkol, massa bahan bakar yang terbakar dalam silinder dan tekanan silinder direkam secara simultan ke dalam komputer yang terhubung ke *engine dynamometer*.

Properti bahan bakar yang digunakan seperti tersaji dalam Tabel 2. Urutan bahan bakar yang diuji adalah diesel murni (D100), BD65 (65% biodiesel + 35% diesel), BD45, dan BD25.



Gambar 1. Peralatan eksperimen

Tabel 1. Spesifikasi mesin diesel

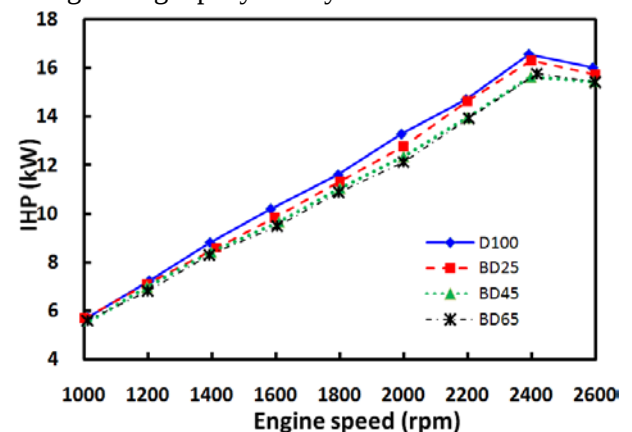
Item	Specification
Engine type	In-line, vertical, 4-stroke
Cylinder number	3
Bore, stroke, capacity	75 mm x 70 mm, 927 cm ³
Combustion system	In-direct, vortex chamber
Compression ratio	22 : 1
Injection timing (BTDC)	24°
Injection pump	Bosch K type mini pump
Injection pressure	13.7 MPa
Injection nozzle	Throttle type

Tabel 2. Properti bahan bakar

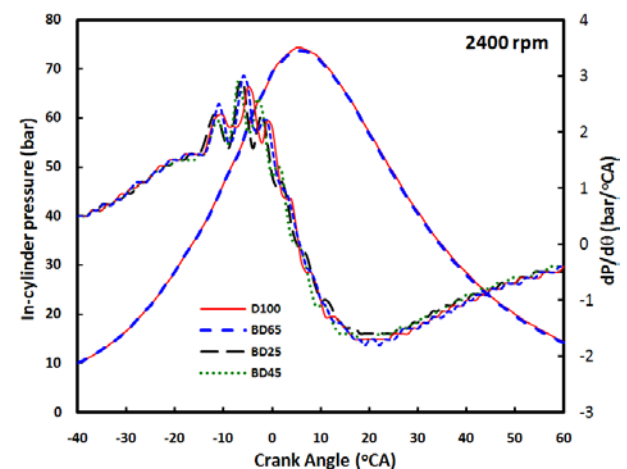
Fuel properties	Diesel	Biodiesel
Density (kg/m ³)	850	882
Viscosity (mm ² /s)	3.25	4.3
Flash point (°C)	68	177.9
Cetane number	54.6	54.2 ÷ 58
LHV (MJ/kg)	43.15	39

Hasil dan Pembahasan

Gambar 2 menunjukkan grafik IHP (*indicated horse power*) dengan variasi kecepatan putaran mesin. IHP meningkat sampai 2400 rpm kemudian menurun pada rpm yang lebih tinggi. IHP mengalami penurunan akibat peningkatan kandungan biodiesel, dan tertinggi dicapai oleh bahan bakar diesel murni. Hal ini dapat dimengerti karena LHV biodiesel memang lebih rendah dibanding diesel murni. Pengamatan lebih detail menunjukkan bahwa penurunan daya akibat LHV biodiesel tidak setinggi perbedaan LHV-nya. Sebagai contoh, LHV biodiesel 9.2% lebih rendah dari LHV diesel murni, akan tetapi IHP BD65 bervariasi 2%-8.7% lebih rendah daripada diesel murni tergantung kecepatan putaran mesin. Untuk hal ini diduga sifat lubricity biodiesel yang lebih baik diduga sebagai penyebabnya.



Gambar 2. IHP dengan variasi putaran mesin

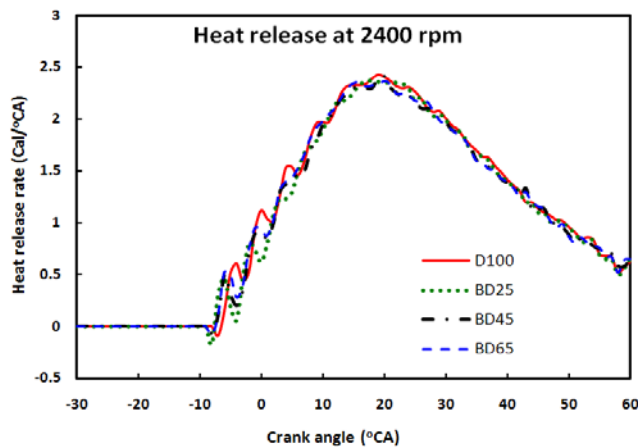


Gambar 3. Karakteristik semprotan

Selain LHV, densitas biodiesel yang lebih tinggi bisa juga mempengaruhi proses pembakaran, dikarenakan

menghasilkan atomisasi bahan bakar yang lebih buruk (ketika diinjeksikan) dibanding diesel murni.

Gambar 3 menunjukkan variasi tekanan dalam silinder mesin berdasar posisi sudut poros engkol (*crank angle*) untuk D100 dan BD65 pada 2400 rpm. Laju perubahan tekanan dalam bar/°CA juga disajikan dalam grafik yang sama. Dari grafik terlihat bahwa tekanan maksimum di dalam silinder D100 lebih besar daripada campuran diesel-biodiesel. Hal ini disebabkan LHV D100 yang lebih besar. Sebaliknya biodiesel menunjukkan laju perubahan tekanan yang lebih tinggi sesaat sebelum tekanan maksimum dalam silinder. Hal ini diduga merupakan peran dari kandungan oksigen yang lebih tinggi dalam biodiesel yang menghasilkan pembakaran lebih baik pada selang waktu pembakaran tersebut.



Gambar 4. Laju pelepasan panas

Laju panas yang dilepas (*heat release rate*) selama pembakaran dalam silinder pada 2400 rpm ditampilkan dalam Gambar 4. Dari grafik terlihat bahwa biodiesel memulai pembakaran lebih awal dibanding D100. Laju pelepasan panas yang dihasilkan D100 lebih tinggi dibandingkan campuran biodiesel. Hal ini konsisten dengan hasil IHP yang lebih tinggi oleh diesel murni. Parameter-parameter pembakaran terkait Gambar 3 dan 4 dirangkum dalam Tabel 3 dan 4. Permulaan injeksi bahan bakar diasumsikan sama dengan spesifikasi mesin, sedangkan awal dan akhir pembakaran ditentukan dari data *heat release* dan massa bahan bakar yang terbakar yang terekam dalam komputer. Tekanan maksimum yang dihasilkan D100 adalah 74.4 bar, sedikit lebih tinggi dibanding BD65 yang sebesar 73.8 bar.

Dalam kaitan dengan periode pembakaran, tercatat BD65 mulai terbakar lebih awal dibanding D100. Hal ini berarti *ignition delay* BD65 lebih pendek dibanding D100. Sebaliknya, akhir pembakaran BD65 terjadi lebih lama dibanding D100. Fenomena ini juga terjadi pada BD25 dan BD45. Dari data awal dan akhir pembakaran, disimpulkan bahwa durasi

pembakaran campuran diesel-biodiesel lebih lama dibanding diesel murni. Durasi pembakaran yang lebih lama dalam silinder merupakan kondisi yang lebih buruk. Diduga viskositas dan densitas biodiesel yang lebih tinggi mengakibatkan kenaikan tekanan yang lebih cepat dalam aliran bahan bakar sehingga lebih cepat terinjeksi dan lebih awal terbakar. Pada sisi yang lain, densitas dan viskositas tinggi menghasilkan atomisasi bahan bakar dan pencampuran udara-bahan bakar yang lebih lambat sehingga pada akhirnya pembakaran berlangsung lebih lama.

Tabel 3. Parameter tekanan dan pelepasan panas

Bahan bakar	Tekanan maks (bar)	Pelepasan panas maks (kal/°CA)
D100	74.4	2.43
BD25	74.2	2.37
BD45	74.1	2.40
BD65	73.8	2.37

Tabel 4. Parameter pembakaran

BB	Awal injeksi (°BTDC)	Awal pembakaran (°BTDC)	Ignition delay (°)	Akhir Pembakaran (°ATDC)	Durasi pembakaran (°CA)
D100	24	7	17	91	98
BD25	24	8	16	97	105
BD45	24	8	16	98	106
BD65	24	8	16	96	104

Kesimpulan

Pengujian eksperimental mesin diesel injeksi tak-langsung telah dilakukan menggunakan bahan bakar diesel dan biodiesel. Dari hasil pengujian disimpulkan bahwa penggunaan biodiesel menghasilkan daya mesin yang lebih rendah dibanding diesel murni. Analisis pembakaran dalam silinder menunjukkan tekanan maksimum dan pelepasan panas yang dihasilkan diesel murni lebih besar dibanding biodiesel. Nilai kalor bakar biodiesel yang lebih rendah dapat disimpulkan sebagai penyebab kedua hal tersebut. Sedangkan dalam hal durasi pembakaran biodiesel memulai pembakaran lebih awal dan mengakhiri pembakaran lebih lambat dibanding diesel murni, yang berarti durasi pembakaran biodiesel lebih panjang daripada diesel murni, diduga disebabkan oleh densitas dan viskositas biodiesel yang lebih tinggi yang mengakibatkan atomisasi yang buruk dan akhirnya pencampuran udara-bahan bakar terjadi lebih lama.

Ucapan Terima kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dirjen Dikti, Kementerian Pendidikan RI atas dukungan finansial untuk studi dan penelitian ini; dan kepada Prof. Song Kyu-Keun dari Chonbuk National University, Korea Selatan, atas supervisinya dalam penelitian ini.

Referensi

- Ayhan Demirbas, Biodiesel - *a realistic fuel alternative for diesel engines*, Springer (2008).
- Duran Altiparmak, Ali Keskin, Atilla Koca, Metin Guru, *Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester-diesel fuel blends*, Bioresource Technology 98, 241-246 (2007).
- Magin Lapuerta, Octavio Armas, Jose Rodriguez-Fernandez, *Effect of biodiesel on diesel engine emissions*, Progress in Energy and Combustion Science 34 198-223 (2008).
- C.C. Enweremadu, H.L. Rutto, *Combustion, emission and engine performance characteristics used cooking oil biodiesel – A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 2863-2873 (2010).
- Jinlin Xue, Tony E. Grift, Alan C. Hansen, *Effect of biodiesel on engine performances and emissions*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 1098-1116 (2011).
- D. Laforgia, V. Ardito, *Biodiesel fueled engines: performances, emissions and heat release investigation*, Biosource Technology 51 53-59 (1995).
- Kyunghyun Ryu, Youngtaig Oh, *A study on the usability of biodiesel fuel derived from rice bran oil as an alternative fuel for IDI diesel engine*, KSME International Journal, Vol. 17 No. 2, pp. 310-317 (2003).
- Kyunghyun Ryu, Youngtaig Oh, *Combustion characteristics of an agricultural diesel engine using biodiesel fuel*, KSME International Journal, Vol. 18 No. 4, pp. 709-717 (2004).
- Murat Cetin, Fikret Yuksel, *The use of hazelnut oil as a fuel in pre-chamber diesel engine*, Applied Thermal Engineering 27 63-67 (2007).
- Mustafa Canakci, Ahmet Necati Ozsezen, Ali Turkcan, *Combustion analysis of preheated crude sunflower oil in an IDI diesel engine*, Biomass and Bioenergy 33 760-767 (2009).
- Ahmet Necati Ozsezen, Mustafa Canakci, *The emission analysis of an IDI diesel engine fueled with methyl ester of waste frying palm oil and its blends*, Biomass and Bioenergy 34 1870-1878 (2010).
- A. Senatore, M. Cardone, V. Rocco, M.V. Prati, *A comparative analysis of combustion process in DI diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel*, SAE Technical Paper Series, 2000-01-0691 1-10 (2000).
- Merve Cetinkaya, Yahya Ulusoy, Yucel Tekin, Filiz Karaosmanoglu, *Engine and winter road test performances of used cooking oil originated biodiesel*, Energy Conversion and Management 46 1279-1291 (2005).
- Sehmus Altun, Husamettin Bulut, Cengiz Oner, *The comparison of engine performance and exhaust emission characteristics of sesame oil-diesel fuel mixture with diesel fuel in a direct injection diesel engine*, Renewable Energy 33 1791-179 (2008).
- Ahmet Necati Ozsezen, Mustafa Canakci, Ali Turkan, Cenk Sayin, *Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters*, Fuel 88 629-636 (2009).

Perancangan Ulang Stasiun Perakitan Motor Listrik Asinkron dengan Pendekatan *Virtual Manufacturing* dan Pengukuran Waktu Kerja Dengan Video Analisis

Agus Sutanto

Bidang Rekayasa Sistem Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin,
Fakultas Teknik Universitas Andalas
Kampus Limau Manis Padang 25163
E-mail : sutanto@ft.unand.ac.id

Abstrak

Karya tulis ini berkenaan dengan usaha-usaha yang sudah dilakukan untuk mengurangi waktu baku perakitan motor listrik asinkron pada sebuah perusahaan manufaktur motor listrik sekaligus memperbaiki aspek ergonomis dalam bekerja. Metodologi yang dipakai adalah menggabungkan pengukuran waktu kerja mempergunakan video analisis dengan pendekatan *virtual manufacturing*. Istilah *virtual manufacturing* ini merupakan suatu pendekatan yang memanfaatkan perangkat lunak dalam tahapan perancangan yang bertujuan untuk pemodelan, simulasi dan visualisasi fasilitas produksi secara tiga dimensi pada media komputer. Penggabungan metoda ini bertujuan untuk mengidentifikasi dengan lebih cepat aktifitas yang tidak memberikan nilai tambah serta posisi kerja yang kurang ergonomis dengan cara mensimulasikannya. Selain itu penggabungan kedua metoda ini mempermudah komunikasi dalam proses perancangan dan memperpendek waktu implementasi hasil rancangan tersebut dalam suatu tata letak stasiun perakitan motor listrik asinkron yang baru. Dari pengukuran waktu kerja mempergunakan video analisis diperoleh aktifitas utama operator hanya 30% dari waktu total perakitan sedangkan sisanya merupakan aktifitas sekunder, aktifitas menunggu karena ada gangguan dan aktivitas pengukuran (aktivitas tambahan). Aktifitas sekunder ini terdiri dari aktifitas berjalan (24%), penanganan alat transport (24%) serta persiapan komponen rakitan dan aktifitas kontrol (52%). Simulasi pada tempat kerja dengan pendekatan *virtual manufacturing* mengidentifikasi sekitar 13,7% dari proses perakitan memiliki posisi kerja operator yang kurang ergonomis. Rancang ulang stasiun kerja perakitan motor juga telah dilakukan dengan memakai software Ergoplan. Konsep *lean manufacturing* seperti *one piece flow*, *cellular layout* serta eliminasi pemborosan (*waste*) dipertimbangkan pada proses perancangan ulang. Selain itu faktor ergonomis dan mengurangi aktifitas sekunder dalam bekerja menjadi perhatian utama dalam disain ulang stasiun kerja perakitan yang baru. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pengurangan waktu perakitan total hampir sebesar 32% dan posisi tubuh yang kurang ergonomis dapat dikurangi secara signifikan.

Keywords: stasiun perakitan, virtual manufacturing, pengukuran waktu kerja, video analisis

1 PENDAHULUAN

Secara umum perancangan ulang suatu stasiun perakitan memiliki dua manfaat utama yaitu kegunaan yang berhubungan dengan manusia dan manfaat ekonomis. Mengurangi waktu baku proses, mereduksi aktifitas sekunder dan waktu menunggu atau meningkatkan kapasitas produksi adalah beberapa tujuan yang bernilai ekonomis dalam suatu perancangan stasiun kerja. Sedangkan yang berhubungan dengan manusia yang berkerja adalah yang berkaitan prinsip-prinsip ergonomi dalam perancangan suatu stasiun kerja. Hal ini sangat bermanfaat dalam memperbaiki efisiensi kerja, meningkatkan keselamatan kerja dari cedera yang dapat terjadi dan memberi motivasi bagi operator pada suatu stasiun kerja. Dengan kemajuan teknologi

komputer dan perangkat lunak yang ada, integrasi prinsip ergonomi dalam tahapan perancangan dapat dilakukan dengan pendekatan *virtual manufacturing* [3, 9,14]. Dengan cara ini suatu stasiun perakitan yang nyata dimodelkan secara digital dan simulasi dapat dilakukan secara virtual sebelum diimplementasikan. Aspek ergonomi tersebut dalam disain stasiun kerja antara lain kesesuaian antropometri manusia dengan stasiun kerja, postur tubuh dalam bekerja, jangkauan tangan, *visibility* serta identifikasi resiko yang potensial terjadi akibat suatu pekerjaan [3]. Dibandingkan dengan cara tradisional, metoda *virtual manufacturing* dapat menghasilkan berbagai macam alternatif disain serta memberikan suatu solusi yang lebih baik dengan waktu yang relatif singkat.

Akan tetapi pendekatan *virtual manufacturing*

ini kurang efisien dan rendah tingkat urgensinya untuk menganalisa seluruh aktivitas perakitan yang terdiri dari ribuan segmen kerja. Hal ini karena diperlukan waktu yang sangat lama dan usaha yang besar untuk pemodelan, simulasi dan analisa seluruh proses (gerakan) perakitan dan secara virtual untuk mendapatkan waktu baku. Untuk itu pendekatan *virtual manufacturing* perlu digabung dengan pengukuran waktu kerja dengan memakai data rekaman video agar durasi solusi permasalahan menjadi lebih singkat. Dalam hal ini seluruh aktivitas perakitan produk yang dilakukan oleh operator direkam dengan memakai kamera video dan hasil rekaman dianalisis.

Pada karya tulis ini kedua pendekatan tersebut di atas digabung untuk merancang ulang stasiun kerja perakitan motor asinkron pada suatu perusahaan PT. X. Selain itu prinsip-prinsip *lean manufacturing* seperti mengurangi pemborosan (*waste*), *one piece flow*, dan *cellular layout* juga menjadi pertimbangan tersendiri pada proses perancangan ulang [7, 16]. Hasil yang ingin diperoleh adalah waktu perakitan dapat direduksi, aliran proses lebih mengalir, dan postur kerja yang kurang ergonomis dapat direduksi.

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aspek Ergonomi dalam Disain Stasiun Kerja

Ergonomi merupakan suatu ilmu terapan yang menyesuaikan (*fitting*) stasiun kerja dan jenis pekerjaan dengan kapabilitas dari pekerja itu sendiri. Tujuannya adalah untuk menurunkan tingkat resiko cedera dan meningkatkan motivasi dalam bekerja serta sekaligus meningkatkan produktifitas dari aktifitas pekerjaan dalam suatu stasiun kerja. Beberapa studi [2, 5] menunjukkan bahwa penerapan aspek ergonomi dalam aktifitas pekerjaan akan meningkatkan kesehatan dan produktifitas kerja dan pada gilirannya memberi keuntungan ekonomis kepada perusahaan. Pada studi ini juga ditemui bahwa setelah melakukan pelatihan ergonomi kepada pekerja serta perbaikan tempat kerja maka cedera ringan pada daerah tulang belakang berkurang dan pada waktu yang bersamaan produktifitas pekerja meningkat 18% per tahun.

Untuk mendapatkan efisiensi pekerjaan yang optimal, setiap elemen dari sistem kerja harus sesuai dengan ukuran tubuh manusia. Hal ini dikenal dengan aspek antropometri yang merupakan bagian dari ilmu ergonomi yang berhubungan dengan ukuran tubuh manusia. Antropometri manusia memberikan data-data yang sangat penting untuk mendisain stasiun kerja yang ergonomis. Data antropometri terdistribusi secara statistik di antara populasi masyarakat tertentu. Menentukan tinggi tempat kerja, penempatan perkakas kerja dan kotak komponen yang akan dirakit seharusnya mengikuti aspek

antropometri untuk menghasilkan disain tempat kerja yang lebih optimal.

Postur adalah posisi tubuh manusia dalam bekerja. Pada umumnya istilah untuk postur yang normal dalam bekerja adalah suatu posisi tubuh yang menghasilkan tegangan minimal pada otot dan sendi tubuh manusia. Sebaliknya postur tubuh yang jelek adalah suatu posisi tubuh yang menimbulkan beban yang besar pada kerangka tubuh, otot dan sendi sehingga rentan terhadap resiko cedera. Masalah ini adalah salah satu isu ergonomi dalam merancang suatu stasiun kerja terutama untuk aktifitas kerja manusia seperti mengangkat beban. Menurut Hall [2], kebanyakan cedera yang berhubungan dengan aktifitas pada suatu stasiun kerja adalah cedera tulang belakang (*back injuries*). Dan kebanyakan dari cedera tulang belakang adalah terletak pada cedera tulang belakang bawah (*low back injuries*) yaitu sebesar 70%. Beberapa analisa postur tubuh dalam bekerja sudah diperkenalkan dan salah satunya adalah analisa postur tubuh berdasarkan Metoda OWAS (*Ovako Working Posture Analysing System*) [1] yang dipakai dalam konsep *virtual manufacturing* yang dijelaskan pada karya tulis ini. Metoda ini menilai postur tubuh dalam bekerja dari posisi berbagai bagian tubuh yaitu: 1) tulang punggung, 2) tangan, 3) kaki dan beban kerja. Untuk kasus bagian tulang punggung, sebagai contoh, postur memiliki empat kriteria yaitu posisi tulang punggung tegak, membungkuk, terpuntir dan gabungan membungkuk dan terpuntir. Demikian juga posisi tangan terdiri dari tiga kriteria yaitu kedua tangan di bawah, satu tangan di atas kepala dan dua tangan di atas kepala. Posisi kakipun dengan metoda ini terdiri dari tujuh kriteria dan terakhir beban kerja memiliki tiga kriteria yaitu hingga 10 kg, antara 10-20 kg dan di atas 20 kg. Kombinasi dari empat faktor di atas akan memberikan empat aksi kategori penilaian (*assesment*) yang berbeda terhadap postur kerja yaitu: 1) normal, 2) perlu dilakukan perbaikan 3) perbaikan perlu dilakukan secepatnya dan 4) perbaikan perlu dilakukan sekarang juga. Tugas perancang adalah merencanakan stasiun kerja yang memungkinkan seluruh aktifitas dengan postur kerja yang normal dan mengeliminir sebanyak mungkin postur kerja yang dapat menimbulkan cedera dalam bekerja.

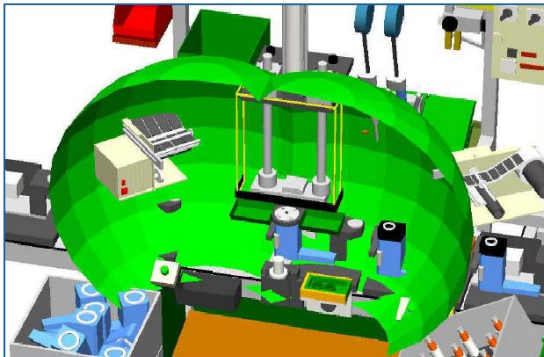
2.2 Metoda Virtual Manufacturing

Metoda *virtual manufacturing* dapat didefinisikan sebagai sebagai suatu media pengembangan disain berbasis komputer dengan memanfaatkan model-model digital tiga dimensi dan mampu disimulasikan sehingga perencana dapat merancang secara virtual (*make it virtually*) sebelum tahap realisasi (*make it for real*) [6, 8, 11, 13].

Pada perancangan ulang stasiun kerja

perakitan ini maka aktivitas manusia dalam bekerja untuk melihat aspek ergonomi (dalam hal ini postur tubuh yang kurang baik) dilakukan dengan pendekatan *virtual manufacturing*. Untuk itu diperlukan model tubuh manusia 3D yang dihasilkan oleh komputer (disebut juga *computer manikin* atau model manusia digital) dengan kemampuan dapat disimulasikan memainkan peranan penting dalam disain stasiun kerja. Secara prinsip model manusia tersebut dapat membantu memperbaiki stasiun kerja, simulasi aktifitas pekerjaan serta analisa ergonomi secara virtual. Aspek antropometri dalam perancangan stasiun kerja seperti jangkauan, ruang dan pandangan (vision) serta aspek bio-mekanik juga dapat dianalisa dengan cara yang relatif mudah.

Selain itu pendekatan *virtual manufacturing* dapat digunakan untuk merancang layout tempat kerja secara 3D dilakukan dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip ergonomi yang menyelaraskan manusia yang melakukan aktifitas kerja dengan ukuran dari sistem kerja itu sendiri (Gambar 1). Disain tempat kerja ini menghasilkan dimensi yang sesuai serta penataan letak untuk alat bantu kerja (tools dan fixtures) serta container/ boks komponen yang didasari oleh prinsip-prinsip antropometri. Beberapa faktor yang mendasari pemberian dimensi tempat kerja ini adalah ukuran tubuh manusia, jenis pekerjaan, serta kondisi dan ukuran dari obyek kerja itu sendiri.



Gambar 1. Disain layout tempat kerja dengan pendekatan *virtual manufacturing*

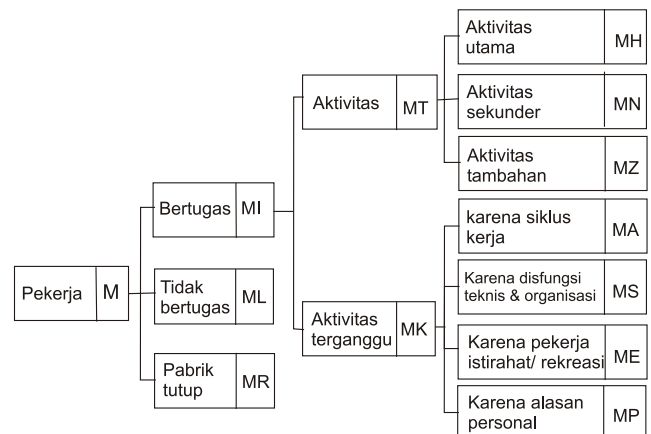
Pada metoda *virtual manufacturing*, disain layout tempat kerja ini lebih mudah dilakukan karena metoda ini dilengkapi dengan beberapa model manusia yang dengan beberapa persentil (5%, 50% dan 95%). Selain itu beberapa jenis jangkauan yang bersesuaian dengan persentil pekerja yang diinginkan dengan mudah dapat dilakukan. Selain itu metoda ini diintegrasikan dengan model grafik tiga dimensi sehingga sangat menyerupai dengan kondisi rilnya.

2.3 Pengukuran Waktu Kerja

Pengukuran waktu kerja merupakan usaha untuk menentukan lama kerja yang dibutuhkan seorang pekerja (terlatih dan terqualifikasi) dalam

menyelesaikan suatu pekerjaan yang spesifik pada tingkat kecepatan kerja yang normal dalam lingkungan kerja yang terbaik pada saat itu [10]. Pengukuran kerja dapat dilakukan secara langsung atau juga secara tidak langsung. Pengukuran langsung umumnya dilakukan dengan pengukuran jam henti (stopwatch time study) dan sampling kerja (work sampling). Sedangkan pengukuran kerja secara tidak langsung dapat dilakukan dengan memakai data waktu gerakan standar atau disebut dengan predetermimed time system seperti metoda MTM (Method Time Measurement) dan MOST (Maynard Operation Sequence Technique) [4,10]. Pada karya tulis ini pengukuran waktu kerja juga dilaksanakan secara langsung dengan analisis video yang merekam aktivitas operator dalam melakukan proses perakitan secara keseluruhan. Sedikit berbeda dengan *work sampling* yang mengukur data dengan sampel yang acak dan cocok untuk pekerjaan yang tidak berulang, maka mengukur waktu kerja mempergunakan video analisis ini dilakukan untuk seluruh proses perakitan motor asinkron. Tidak saja data waktu kerja yang dapat diperoleh akan tetapi postur tubuh juga teridentifikasi dengan baik.

Setelah pengukuran waktu kerja maka dilakukan analisa dengan membagi operasi perakitan motor ke dalam banyak segmen kerja. Segmen kerja adalah bagian operasi kerja terkecil dengan batasan titik ukur dan parameter ukur yang jelas. Segmen kerja ini diukur dan diklasifikasikan menurut tipe waktu kerja berdasarkan REFA [15] seperti dijelaskan pada Gambar 2.



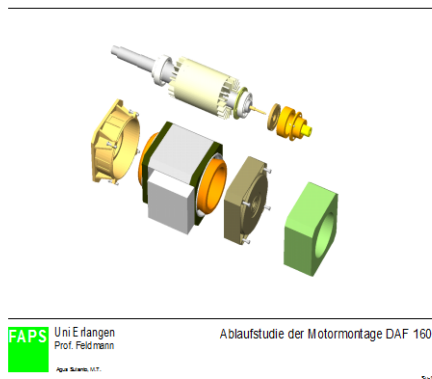
Gambar 2: Klasifikasi waktu kerja dari pekerja berdasarkan REFA [14]

3 METODE PENELITIAN

Pada bagian ini dijelaskan tentang aktifitas proses perakitan motor, proses pengambilan data waktu kerja mempergunakan kamera video, pemodelan 3D dari tempat perakitan dan simulasi aktifitas kerja serta analisis dari video *stream* yang

sudah diperoleh.

3.1 Langkah Perakitan Motor Asinkron



Gambar 3: Gambar rakitan motor asinkron

Rakitan motor asinkron diperlihatkan pada Gambar 3. Urutan perakitan motor asinkron yang dilakukan pada Perusahaan X terdiri dari beberapa tahapan yaitu:

- membaca order dan merakit rotor
- perakitan unit bantalan belakang (suaian paksa dan perakitan dalam kondisi panas)
- pendinginan bantalan
- perakitan unit bantalan depan dan stator
- pengukuran motor
- perakitan unit *zapfen* ^[a]
- perakitan unit *zwischenflansch* ^[a]
- perakitan unit *schutzhaube* ^[a]

3.2 Pengambilan Waktu Kerja

Pengambilan waktu kerja perakitan motor asinkron dilakukan dengan kamera video. Pekerja yang melakukan aktifitas perakitan adalah seorang yang sudah memiliki kualifikasi akan pekerjaan tersebut dan berpengalaman lebih dari satu tahun kerja.

Tabel 1: Segmentasi kerja untuk suatu tahapan rakitan

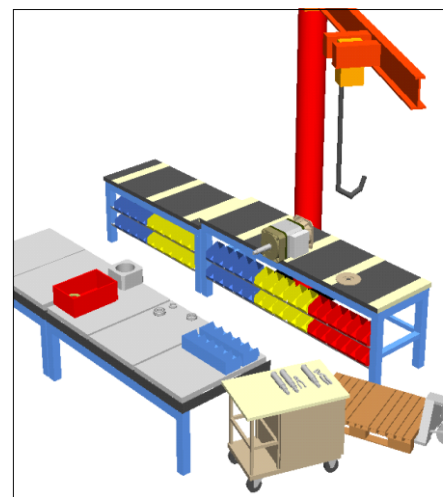
No.	Segmen kerja dan batasan titik ukur	Qty	Parameter ukur	T (sek)	T _{kum} (sek)	Tipe waktu
1	Persiapan pengemukan dan pembersihan bearing	1	2m jalan	16	16	MN
	Kertas pembersih dilepas					
2	Check visual, rumah motor dan kumparan dibersihkan	1	2m jalan	12	28	MN
	Ke meja kerja					
3	Ambil Gemuk dan pengemukkan rumah bantalan	1	2m jalan	20	48	MH
	Gemuk diletakkan					
4	Dst.	...	...	...	...	...

Tabel 1 merupakan contoh video analisis dari suatu

proses perakitan unit bantalan belakang. Proses perakitan ini terdiri dari banyak segmentasi kerja dengan batasan titik ukur yang jelas untuk tiap segmen dan juga parameter ukur yang didefinisikan berdasarkan video analisis dan model 3D dari stasiun kerja perakitan yang ada. Waktu kerja setiap segmen ditentukan dari jam ukur (stopwatch) pada rekaman video. Seterusnya segmen kerja ini diklasifikasi berdasarkan tipe waktu kerja menurut definisi REFA (asosiasi work and time study Jerman) seperti aktivitas utama (MH), aktivitas sekunder (MN), dll.

3.3 Model virtual layout stasiun perakitan

Langkah berikutnya adalah membuat model virtual dari layout stasiun perakitan motor yang ada dengan memakai software Ergoplan dari Delmia (sekarang dikenal dengan nama Process Engineer)



Gambar 4: Gambar 3D layout stasiun perakitan motor yang ada

Model virtual 3D ini digunakan untuk menganalisa kesesuaian dimensi kerja dengan manusia, terutama menyangkut ukuran tubuh dan postur manusia dalam bekerja. Model 3D dari layout stasiun kerja ini menjadi acuan utama untuk mengadakan rancang ulang stasiun perakitan motor asinkron yang baru. Diharapkan stasiun kerja yang baru ini dapat mereduksi aktivitas sekunder (MN) pekerja atau mengeliminasi aktifitas yang mengganggu akibat disfungsi teknis pada proses perakitan. Disamping itu stasiun kerja yang baru dapat lebih sesuai dengan stasiun perakitan berdiri. Postur tubuh dalam bekerja yang lebih baik dan mereduksi gerakan non-produktif seperti berjalan dan mempersiapkan komponen juga menjadi perhatian utama pada perancangan ulang ini.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari segmentasi kerja hasil video analisis diperoleh distribusi kerja berdasarkan klasifikasi aktivitas dari pekerja tersebut sesuai klasifikasi REFA. Hasil distribusi aktivitas kerja ini diperlihatkan pada Tabel 2. Berdasarkan tabel ini diperoleh bahwa aktivitas utama perakitan adalah 30%, aktivitas sekunder 30%, aktivitas tambahan dalam hal ini aktivitas mengukur 12% dan sisanya sebesar 28% adalah aktivitas terganggu akibat menunggu bantalan yang dipasang dengan suaian paksa (dengan dipanaskan) pada langkah sebelumnya menjadi dingin. Waktu perakitan total pada video analisis ini adalah 3551 detik atau 59 menit 11 detik.

Tabel 2 Distribusi aktivitas pekerja untuk setiap langkah perakitan

No.	Tipe waktu Langkah perakitan	MH (sek.)	MN (sek.)	MZ (sek.)	MS (sek.)	Jmlh (sek.)
1	Membaca order dan merakit rotor	41	171	—	—	212
2	Rakit unit bantalan belakang (suaian paksa)	130	54	—	—	184
3	pendinginan bantalan	—	—	—	981	981
4	perakitan unit bantalan depan dan stator	208	174	—	—	382
5	Pengukuran motor	—	195	186	—	381
6	Rakit unit <i>zapfen</i>	131	96	136	—	363
7	Rakit unit <i>zwischenflansch</i>	408	220	109	—	737
8	Rakit unit <i>schutzhaube</i>	167	140	4	—	311
	J u m l a h	1085	1050	435	981	3551

Keterangan:

MH : aktivitas utama

MN : aktivitas sekunder

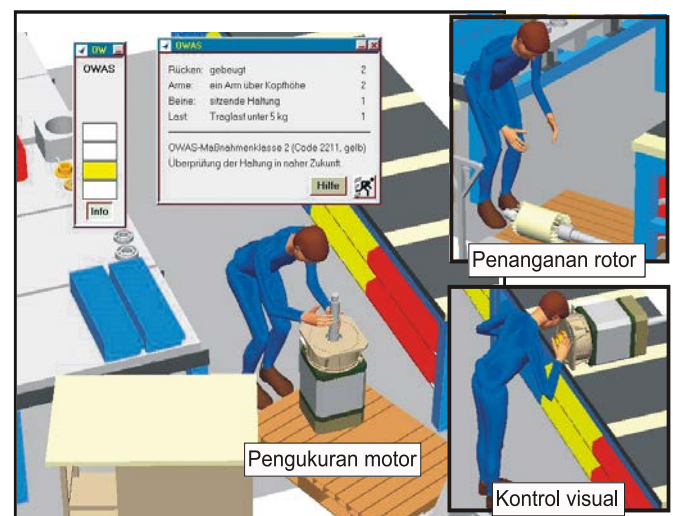
MZ : aktivitas tambahan (pengukuran)

MS : aktivitas terganggu karena disfungsi teknis

Berdasarkan segmentasi kerja untuk masing-masing langkah perakitan juga diperoleh distribusi untuk aktivitas sekunder. Aktivitas ini terdiri dari aktivitas berjalan sebesar 24%, penanganan alat transport 24% serta penyiapan komponen rakitan dan peralatan penanganan material sebesar 52%. Berdasarkan data ini diperoleh potensi pengurangan waktu perakitan berasal dari waktu berjalan, persiapan komponen rakitan dan aktivitas terganggu akibat menunggu bantalan menjadi dingin yang menghabiskan waktu sebesar 28% dari total perakitan. Untuk hal yang terakhir, direkomendasikan bahwa pekerjaan perakitan bantalan secara suaian paksa dengan temperatur tinggi dilakukan sebelum perakitan (*vor-montage*) atau pada saat penyiapan barang di gudang. Kondisi ini berdampak pada penurunan waktu saat perakitan karena menghilangkan waktu menunggu (*waiting*). Hal ini bersesuaian dengan prinsip-prinsip *lean manufacturing* dalam rangka mereduksi atau

mengeliminasi pemborosan (*waste*). Terutama kegiatan ini akan menurunkan waktu baku perakitan ini merupakan *cycle time* terbesar dari proses produksi motor asinkron tersebut.

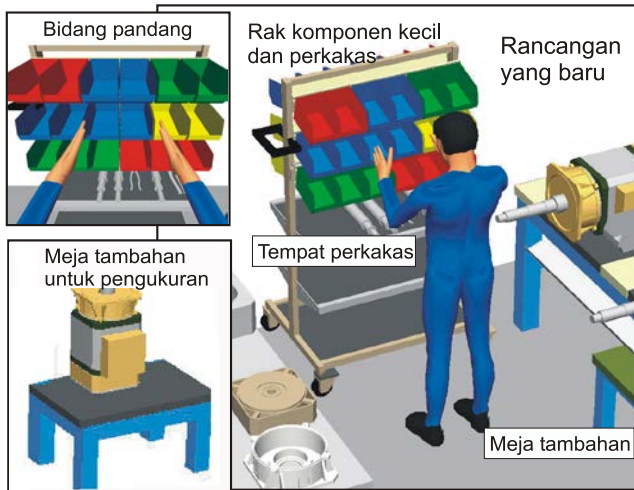
Bersamaan dengan pengukuran waktu kerja dengan video analisis juga dilakukan pembuatan model virtual 3D dari layout stasiun perakitan motor dengan memakai software Ergoplan dari Delmia (sekarang disebut Process Engineer). Dengan model yang ada dapat dianalisa kesesuaian tinggi kerja dan penempatan kontainer atau boks untuk komponen yang optimal serta analisa postur tubuh dalam bekerja. Berdasarkan data video dan simulasi model operator dalam bekerja diperoleh sekitar 13,7% dari seluruh aktivitas perakitan menghasilkan postur tubuh yang kurang ergonomis. Kriteria OWAS dipakai dalam identifikasi postur kerja yang kurang ergonomis ini. Kebanyakan hal ini disebabkan oleh benda kerja yang ditangani terlalu rendah sehingga posisi tulang punggung membungkuk seperti diperlihatkan pada Gambar 5. Aktivitas yang mengakibatkan postur tubuh dalam bekerja yang harus diperbaiki adalah aktivitas pengukuran motor, penanganan rotor yang diletakan pada palet kayu dan aktivitas dari kontrol visual yang sering dilakukan operator. Yang terakhir ini disebabkan oleh tinggi meja kerja perakitan yang kurang sesuai dengan aktivitas kerja berdiri.



Gambar 5: Postur tubuh yang harus diperbaiki

Hal ini menjadi potensi untuk perbaikan dan rancang ulang stasiun kerja perakitan dari sudut pandang ergonomis. Beberapa perubahan yang dilakukan adalah menambah tinggi kerja stasiun perakitan dari 800 mm menjadi 870 mm (stasiun kerja berdiri). Pedoman perhitungan tinggi kerja berdasarkan standar DIN 33406 [12] untuk tipe kerja yang membutuhkan banyak gerakan dengan kontrol visual yang rendah. Penambahan meja kerja khusus untuk proses pengukuran juga dilakukan pada perancangan baru. Aktivitas pengukuran motor yang

sebelumnya dilakukan di atas pallet kayu dengan tinggi kerja yang rendah sehingga aktivitas pengukuran dilakukan dengan postur tubuh yang membungkuk (lihat Gambar 5). Penambahan meja kerja khusus untuk pengukuran akan menghasilkan postur kerja yang lebih baik. Selain itu rak komponen kecil dengan rak perkakas untuk merakit dibuat dalam satu tempat seperti diperlihatkan pada Gambar 6. Rancangan yang baru ini akan memberikan bidang pandang dan postur kerja yang lebih baik (sebelumnya boks komponen diletakkan di bawah meja dengan bidang pandang yang kurang baik).



Gambar 6: Hasil perancangan ulang

Konsep *lean manufacturing* seperti *one piece flow*, dan *cellular layout* juga diadopsi pada perancangan ulang stasiun perakitan motor ini. Meja kerja stasiun perakitan yang tidak lebar hanya memungkinkan maksimum dua motor dirakit secara bersamaan. Hal ini berbeda dengan kondisi sebelumnya dimana untuk satu kali perakitan dilakukan bersamaan untuk empat motor listrik asinkron. Bentuk layout stasiun hasil perancangan ulang berbentuk U (*cellular layout*) menghasilkan jarak yang lebih berdekatan dan mempersingkat aktivitas berjalan dan mempercepat penanganan material dan komponen. Secara keseluruhan hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pengurangan waktu perakitan total hampir sebesar 32% dari kondisi semula dan posisi tubuh yang kurang ergonomis dapat dikurangi secara signifikan.

5 KESIMPULAN

Pada karya tulis ini telah dilakukan perancangan ulang stasiun kerja perakitan motor asinkron yang terdiri dari beberapa varian produk. Manfaat yang ingin dicapai terdiri atas manfaat yang bersifat ekonomis dan yang berhubungan dengan faktor manusia dalam bekerja (ergonomis). Pendekatan solusi yang dipakai pada perancangan ulang adalah

pengabungan pengukuran waktu kerja mempergunakan video analisis dan pendekatan *virtual manufacturing* dengan memakai software yang ada. Berdasarkan video analisis dengan mengadakan sampling aktivitas perakitan, teridentifikasi adanya aktivitas terganggu akibat disfungsi teknis (menunggu bantalan menjadi dingin), aktivitas berjalan dan aktivitas penyiapan komponen rakitan dan peralatan penanganan material yang memberikan peluang untuk diperbaiki pada perancangan ulang stasiun kerja perakitan motor asinkron ini. Demikian juga dengan simulasi model 3D operator dengan memakai pendekatan *virtual manufacturing* teridentifikasi adanya postur kerja yang kurang ergonomis sebesar 13,7% dari seluruh aktivitas perakitan. Kondisi ini diakibatkan oleh tinggi kerja yang kurang sesuai. Rancangan ulang stasiun kerja dengan memakai prinsip-prinsip *lean manufacturing* seperti minimalisasi pemborosan (*waste*), *cellular layout* dan *one piece flow* menghasilkan tataletak stasiun kerja yang baru yang lebih ergonomis terutama menyangkut postur tubuh dalam bekerja dan pengurangan waktu perakitan total hampir sebesar 32% dari kondisi semula. Pengurangan waktu perakitan motor yang merupakan *cycle time* tertinggi dari seluruh rangkaian aktivitas produksi motor listrik asinkron membawa dampak kepada peningkatan kapasitas produksi. Kondisi ini harus disertai dengan asumsi bahwa proses pengeringan cat (*permis*) untuk kumparan motor dan stator sudah mempergunakan mesin pengering khusus dengan *cycle time* yang rendah (sebelumnya proses pengeringan ini menjadi *bottle neck* kapasitas produksi). Selain itu, pendekatan *virtual manufacturing* juga mempermudah komunikasi proses perancangan ulang dan memperpendek waktu implementasi hasil rancangan tersebut dalam suatu tata letak stasiun perakitan motor listrik asinkron yang baru.

Ucapan terima kasih

Ucapan terimakasih kepada Prof. K. Feldmann, FAPS, Jerman yang telah memberi kesempatan penulis melakukan kegiatan proyek industri pada UKM perakitan motor listrik di Nuernberg, Jerman.

REFERENSI

1. A.F. Long, *A Computerised System for OWAS Field Collection and Analysis*. In: Mattila M., Karwowski W. (Eds.) *Computer Applications in Ergonomics, Occupational Safety and Health*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1992, pp 353-358
2. A.K. Burton, E. Erg, *Back Injury and Work Loss. Biomechanical and Psychosocial Influences*, *Spine* Vol. 22, Issue 21, 1997

3. A. Sutanto, *Disain Stasiun Kerja Yang Ergonomis Dengan Metoda Virtual Manufacturing*, Jurnal Optimasi Sistem Produksi, Vol. 6 No. 1 (2007)
4. A. Sutanto, *Pengembangan Aplikasi @Webplan Untuk Perhitungan Waktu Standar Pada Proses Perakitan Manual*, Jurnal Optimasi Sistem Produksi Vol. 9 No. 1 (2010)
5. B.P. Bernard, *Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors*, DHHS (NIOSH) Publication No. 97-141, 1997
6. C. Shukla, M.Vazquez, F. F. Chen, *Virtual Manufacturing: An overview*, Journal of Computer and Industrial Engineering, Vol. 31 Issue 1-2 (1996)
7. F.E. Meyers, J.R. Stewart, *Motion and Time Study for Lean Manufacturing*, LAVOISIER, 2002
8. G. Nomden, J. Slomp, N. C. Suresh, *Virtual Manufacturing Cells: A Taxonomy Of Past Research And Identification Of Future Research Issues*, Int. Journal of FMS, Vol. 17 (2005)
9. H.J. Bullinger, W. Bauer et al, *Ergonomic Evaluation with Human Models in Virtual Environments*, Proceeding of 6th International Scientific Conference on Work, Berchtesgaden, Germany, 2002
10. I.Z. Sitalaksana et al, *Teknik Perancangan Sistem kerja*, Penerbit Teknik Industri ITB Bandung, 2006
11. M.C.F. Souza, M. Sacco, A.J.V. Porto, *Virtual Manufacturing As A Way For The Factory Of The Future* . J. of Intelligent Manufacturing, Vol. 17 Num. 6 (2006).
12. N. N., *DIN 33406: Arbeitsplatzmaße im Produktionsbereich; Begriffe, Arbeitsplatztypen, Arbeitsplatzmaße*. Juli 1988
13. O. F. Offodile, L.L. Abdel-Malek, *The Virtual Manufacturing Paradigm: The Impact Of IT/IS Outsourcing On Manufacturing Strategy*, Int. Journal of Production, Vol. 75 Issue 1-2 (2002)
14. P. Banerjee, D. Zetu, *Virtual Manufacturing*, John Wiley & Sons, Newyork, 2001
15. REFA (Hrsg.), *Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 2 Datenermittlung*. 7. Auflage. München: Carl Hanser Verlag 1992
16. T. Melton, *Benefit of Lean Manufacturing –What Lean Thinking has to Offer the Process Industries*, Journal of Chemical Engineering Research and Design, Vol.83 p.662-573 (2005)