

กลุ่ม 1

กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
(วิจัย/วิชาการ)

การจัดทำแผนการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่มีพลังงานจำกัดที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วย
วิธีดีคอนโวลูชัน : กรณีศึกษาการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำในประเทศไทย

OPTIMAL SCHEDULING FOR LIMITED ENERGY UNITS USING
DECONVOLUTION TECHNIQUE: A CASE STUDY OF
HYDRO POWER GENERATION IN THAILAND

กิริติ ชยะกุลศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

Email: keerati.ch@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้วิธีดีคอนโวลูชันในการจัดทำแผนการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่มีพลังงานจำกัด โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยมีการนำความน่าจะเป็นที่โรงไฟฟ้าจะหยุดเดินเครื่องโดยไม่ได้อำนาจไว้มาพิจารณาในการสร้างแบบจำลองของกำลังติดตั้งทั้งหมด และวิธีดีคอนโวลูชันได้ถูกนำมาใช้ในการจัดทำแผนการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่มีพลังงานจำกัดให้เกิดมูลค่าสูงสุด โปรแกรมที่พัฒนาได้ถูกทดสอบกับระบบไฟฟ้าของประเทศไทย โดยผลการทดสอบโปรแกรมแสดงให้เห็นว่าวิธีดีคอนโวลูชันสามารถทำให้ใช้พลังงานที่ถูกระบุไว้ของโรงไฟฟ้าที่มีพลังงานจำกัดได้หมดอย่างเหมาะสม ส่งผลให้เกิดต้นทุนการผลิตรวมต่ำกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้วิธีดีคอนโวลูชัน วิธีดีคอนโวลูชันจึงมีประสิทธิผลในการช่วยจัดตารางเดินเครื่องโรงไฟฟ้ารายวันในกรณีของโรงไฟฟ้าที่มีพลังงานจำกัดได้

คำสำคัญ: โรงไฟฟ้าที่มีพลังงานจำกัด การสร้างแบบจำลองของกำลังติดตั้ง เส้นกราฟาระช่วงเวลาเทียบเคียง
คอนโวลูชัน ดีคอนโวลูชัน

ABSTRACT

This paper investigates a practical application of deconvolution technique-based optimal scheduling for limited energy units (LEUs). The computer program is developed so that the probabilities of unit outage are taken into account by capacity model building, and the deconvolution technique is used to determine the optimal scheduling for LEUs. The program has been tested with the simplified Thailand power system. The results show that the deconvolution technique-based optimal scheduling for LEUs can dispatch all daily energy specified at the optimal condition leading to the lower daily operating cost than that without deconvolution calculation. The method can effectively associate the unit commitment problem as a preliminary scheduling for LEUs.

KEYWORDS: Energy limited unit, Capacity model building, Equivalent load duration curve, Convolution, Deconvolution

1. Introduction

In a power generation scheduling, the operating costs of the units can be found by loading the units under their corresponding equivalent load duration curves (ELDCs) according to the fuel cost and computing the energy generated by each unit (Electricity Generating Authority of Thailand, 2008). The algorithm can easily be implemented if the energy generated by each unit is not limited and its operating condition is only based on its generating capacity and availability, for example, coal-fired, oil fired, gas turbines and nuclear units. However, there are units whose energy is constrained by some other factors. Such units are categorized as limited energy units (LEUs) or assigned energy (AE) units. In case of hydroelectric plants, this constraint may be due to limited reservoir size, run-of-the-river constraint or seasonal rainfall limitation. The cost associated with production of this energy is typically very low and it is most advantageous to use all of the available energy. In case of a fossil fueled units, the constraint may be due to limited fuel supply or the limits on emissions. In case of nuclear, the constraint may be due to insufficient core energy which prevents the unit being run on base load. Beside this energy constraint, the LEUs are also limited by its generating capacity and availability.

In Thailand, the electricity supply industry is presently a vertically integrated structure. The Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) owns and operates transmission network and most of the generations. The Metropolitan Electricity Authority (MEA) and the Provincial Electricity Authority (PEA) own and operate geographical distribution systems. Since 1990, the private investment in the generation sector through small power producers (SPPs) and independent power producers (IPPs) programs has been successfully introduced. Both SPPs and IPPs sell the electricity to EGAT based on the long term power purchase agreements (PPAs). EGAT is a single buyer who subsequently sells the electricity to the MEA, PEA and limited number of direct consumers. Fig. 1 shows the structure of present Thai power system. As of fiscal year 2008, hydro power shares about 12% of total power generation in Thailand. In Thailand, hydro power plants scheduling are strictly based on irrigation requirement. The reservoirs discharge volumes are specified by the Royal Irrigation Department (RID) on daily basis. Therefore, hydro power plants can be modeled as the ELUs and it is productive to develop the tool for optimal scheduling of the hydro generating units.

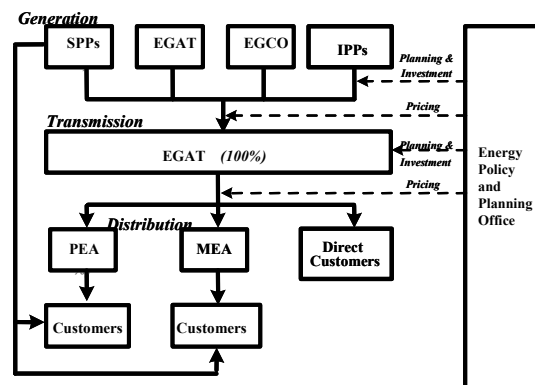


Fig. 1 The structure of present Thai power system

Many techniques have been proposed to determine optimal scheduling of LEUs in power systems. Bloom (J. A. Bloom, 1981) proposed an iterative decomposition type framework where reservoir utilization decisions were made by linear programming master problem and associated marginal costs and benefits were evaluated by a subproblem. The algorithms required multiple solution of subproblem to find the optimal usage of reservoirs. Some heuristic and artificial based optimization techniques have also been applied to solve the optimal hydro-thermal scheduling (A. Rudolf and R. Bayrleithner, 1999: 1460-1468, N. J. Redondo and A. J. Conejo, 1999: 89-95, Chaa-An Li, et. al., 1998: 1051-1056, Xaiomin Bai and S. M. Shahidehpour, 1996, 968-974) Hydro-thermal, scheduling by tabu search and decomposition. However, the probabilities of the unit outages are not included in the problem formulations. To incorporate the probabilities of the unit outages into optimal hydro generating units scheduling, the algorithm to optimize the reservoir utilization by probability production costing has been proposed by Malik and Cory (A. S. Malik and B. J. Cory, 1996: 546-552). Nevertheless, the framework for applying the technique to practical problem has not been fully developed due to its intensive mathematical computation.

In this paper, the program for computing the capacity model building and deconvolution for large generation systems is developed. The deconvolution technique is applied to determine an optimal daily scheduling of hydro power plant. The hydro generating units are model as LEUs. The energy specified of each hydro unit is compared with the calculated expected energy served (EES) to determine an optimal scheduling condition. The method is compared to the daily scheduling without deconvolution process.

2. Problem Formulation for Optimal Scheduling of Energy Limited Units

2.1 A Recursive Algorithm for Capacity Model Building

With merit order operation, if generating units were completely reliable and thus always available when called upon to generate, the areas occupied by each unit under the original load duration curve (LDC) would be sufficient to determine unit specific generated energy. However, generating units are unanticipatedly forced out of service resulting in increased calls for generation on units higher in the merit order.

The increased demand for generation by a specific unit resulting from the forced outage rates (FOR) of all previously loaded units is accounted by modifying the LDC to reflect these forced outages. This is accomplished by computing the equivalent load on a particular unit which is the sum of customer demand and forced outage of previously loaded generators. The cumulative probability distribution, or ELDC, gives the total probability that customer load plus the capacity on forced outage equals or exceeds a given value X when the generating system through the i th unit out of NG total units is being considered.

Each time a unit is loaded, its forced outages have to be added to the current ELDC to derive the new ELDC which reflect the demand seen by the next unit in the merit order. This addition depends on the probability distribution characterizing the forced outages the unit. After the outages of all available units have been added to the customer load, the EENS may be obtained as an area under the resulting ELDC, thus providing a measure of system reliability. The height of the same curve at the capacity point of the system is the loss of load probability (LOLP), that is, the expected proportion of time that customer demand may exceed available generating capacity.

By a recursive algorithm for capacity model building [8], the cumulative probability of a particular capacity outage state of X MW or the equivalent load duration curve, after a unit generating at P_{Gi} MW and force outage rate FOR_i is considered, is given by,

$$ELDC_i(X) = (1 - FOR_i) \cdot ELDC_{i-1}(X) + FOR_i \cdot ELDC_{i-1}(X - P_{Gi}), \quad (1)$$

where,

P_{Gi} = the real power generation of unit i (MW),

$ELDC_i(X)$ = the equivalent load duration curve when the unit i is considered,

$ELDC_{NG}(X)$ = the equivalent load duration curve when all units are considered,

$ELDC_0(X) = LDC(X)$ = the original system load duration curve,

FOR_i = the FOR of generator i , and

ST = the step size used in the calculation (MW).

Appendix A illustrates the probability table of the recursive algorithm for capacity model building. To generalize the algorithm, the step size (ST) used in this paper is one MW. Fig. 2 shows the ELDC after taken into account the units FOR.

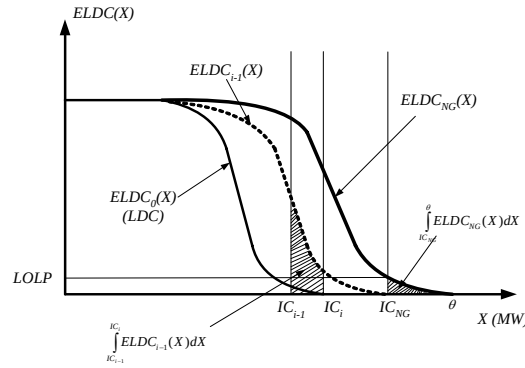


Fig. 2 ELDC obtained by a recursive algorithm for capacity model building

2.2 Deconvolution Process

Deconvolution is the reverse process of convolution. From (1), to find the previous ELDC, with the outage of unit i removed from the ELDC, the outage of unit i can be deconvolved by rearranging (1) as follows,

$$ELDC_{i-1}(X) = \frac{1}{1 - FOR_i} \cdot ELDC_i(X) + \frac{FOR_i}{1 - FOR_i} \cdot ELDC_{i-1}(X - P_{Gi}) \quad (2)$$

Similarly on the ELDC, the outage effect of unit j , which was loaded previously and not necessarily adjacent to unit i can be removed by the following (3). The new ELDC ($ELDC'$) after the effect of unit j , can be computed as,

$$ELDC'_{i-1}(X) = \frac{1}{1 - FOR_i} \cdot ELDC_{i-1}(X) + \frac{FOR_i}{1 - FOR_i} \cdot ELDC'_{i-1}(X - P_{Gi}) \quad (3)$$

2.3 Expected Energy Served and Not Served

The expected energy served by generator i is calculated by,

$$ES_i = (1 - FOR_i) \cdot T \cdot \int_{IC_{i-1}}^{IC_i} ELDC_{i-1}(X) dX \quad (4)$$

and the total daily operating cost is,

$$ETC = \sum_{i=1}^{NG} FC_i = \sum_{i=1}^{NG} PFC_i \cdot ES_i \quad (5)$$

The expected energy not served is calculated by,

$$EENS = T \cdot \int_{IC_{NG}}^{\theta} ELDC_{NG}(X) dX \quad (6)$$

where

ES_i = the expected energy served by generator i (MWh),

T = total period under consideration (24 h),

IC_{i-1} = the sum of capacity when the generating system through the i -th unit is being considered with merit order operation (MW),

IC_i = the sum of capacity when the generating system through the i th unit is being considered with merit order operation (MW),

FC_i = Daily fuel cost of generator i (THB),

PFC_i = Per unit fuel cost of generator i (THB/MWh).

$EENS$ = the expected energy not served (MWh)

IC_{NG} = total installed capacity (MW)

$\theta = X \Big|_{ELDC_{NG}(X)=0}$ = the equivalent system peak load (MW).

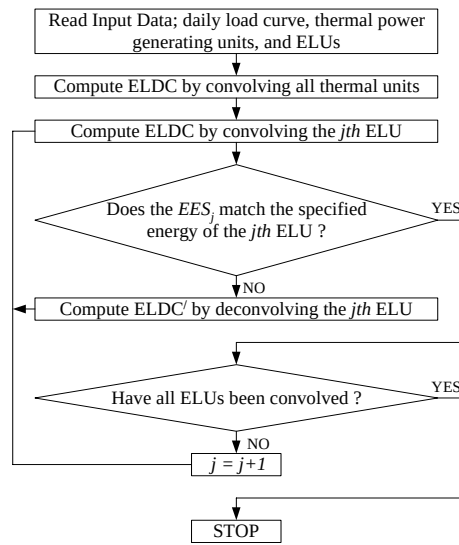


Fig. 3 Computational procedure

The computation of ES_j and $EENS$ is illustrated in Fig. 2. The deconvolution of each LEU is preceded until its EENS matches its daily energy assigned. The computational procedure is shown in Fig. 3.

3. Simulation Results

The test data are arbitrarily chosen from historical data of Thailand power system. The data are simplified and unavailable data are chosen from standard values. There are 95 power generating units, including hydro plants taken into account in the simulation. SPP power plants are dispatched based on the power purchase agreements which are not based on its prices. They are modeled in the load curve based on the power purchase agreement to operate at full capacity from 08.00 a.m. to 08.00 p.m. on weekdays and at 65% of the full capacity from 8.00 p.m. to 8.00 a.m. on weekdays, and whole Saturday and Sunday. IPP and EGAT power plants are operated according to the merit order. The typical daily load curve of Thailand from EGAT is shown in Fig. 4. It is the load curve of peak day in fiscal year 2001 (23 April 2001). The load curve used for simulation is obtained from the peak load in last 6 years of 2008 with the peak of 21,235 MW.

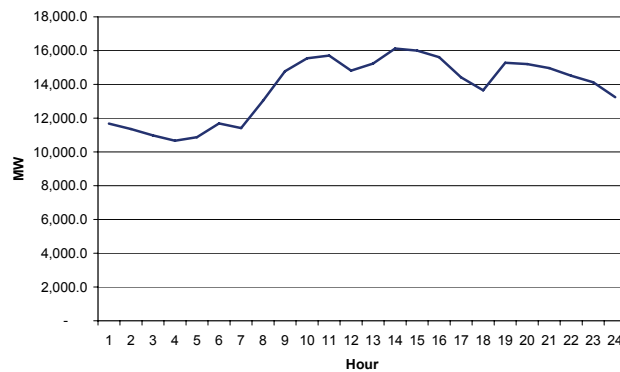


Fig. 4 Daily load curve of Thailand

Table 1 The summary results

Item	Case 1	Case 2
System Peak Excluding SPPs (MW)	2123.52	2123.52
EENS (MWh)	301.97	0.023
LOLP	6.15×10^{-6}	6.12×10^{-10}
LOLH (h)	1.48×10^{-4}	1.47×10^{-8}
Total ES by hydro units (MWh)	14647	14647
ETC (MTHB)	386.42	386.36

There are two case studies which are;

- Case 1: Hydro power plants are modeled in the load curve by using the equivalent MW from the historical water discharge data without using deconvolution techniques and
- Case 2: Hydro power plants are convolved and deconvolved using the deconvolution technique.

The ELDC with and without deconvolutions are shown in Fig. 5 and 6, respectively. Table 1 shows the simulation results including LOLP, LOLH, EENS, ETC, and the total ES of hydro generating units of Case 1 and Case 2. In Fig. 5., the hydro power plants are modeled in the load curve and installed capacity excluding the hydro power plants and SPP is shown. In Fig.6., the hydro power plants are loading in to the ELDC using deconvolution technique and the installed capacity including hydro power plant but excluding SPP is shown.

In this simulation, the LOLP of scheduling with deconvolution is shown to be lower than that of scheduling without deconvolution leading to the lower LOLH and EENS. The optimal condition for hydro generating units scheduling is to operate them in between 1798.35 MW to 2140.77 MW of the load curve as shown in Fig.6. With the same EES of hydro generating units, the ETC of the optimal scheduling of using deconvolution is slightly lower than that without deconvolution. Despite the small daily saving of the Thai system, the total annual savings in THB could be substantial. This implies that deconvolution can efficiently utilize the specified energy of hydro generating units.

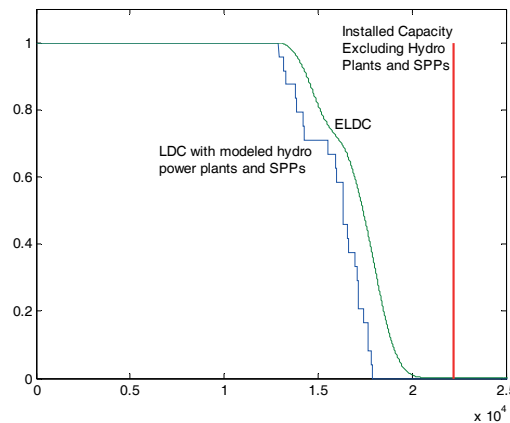


Fig. 5 the results from capacity model building without deconvolution (Case 1)

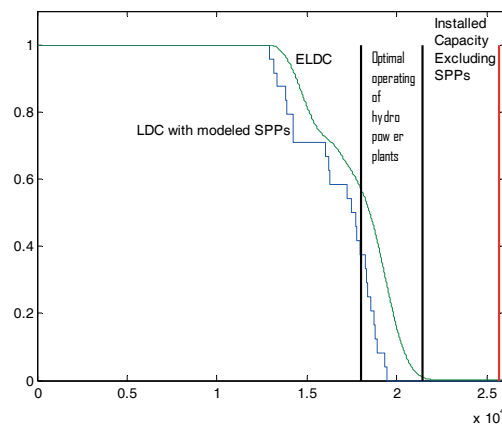


Fig. 6 The result from deconvolution for optimal scheduling of hydro generating units (Case 2)

4. Conclusion

The deconvolution technique base optimal scheduling of LEUs in power system has been investigated. The method can efficiently determine the optimal scheduling of hydro generating units. The developed program is potentially applicable for preliminary scheduling of LEUs before solving the unit commitment problem.

5. Acknowledgement

This work is supported by The Thailand Research Fund under contract number RDG5150056.

6. References

- A. Rudolf and R. Bayrleithner, 1999. "A genetic algorithm for solving the unit commitment problem of hydro-thermal power system." **IEEE Trans. Power System**, Vol. 14, No. 4: 1460-1468.
- Electricity Generating Authority of Thailand, 2008. **Statistical Report Fiscal Year 2008**, Thailand.
- A. S. Malik and B. J. Cory, 1996. "Efficient algorithm to optimise the energy generation by pumped storage units in probabilistic production costing." **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**: 546-552.

- Chaa-An Li, R. B. Johnson, A. J. Svoboda, Chung-Li Tseng, and E. Hsu, 1998. "A robust unit commitment algorithm for hydro-thermal optimization." **IEEE Trans. Power Systems**, Vol. 13, No. 3: 1051-1056.
- N. J. Redondo and A. J. Conejo, 1999. "Short-term hydro-thermal coordination by Lagrangian relaxation: solution of the dual problem." **IEEE Trans. Power Systems**, Vol. 14, No. 1: 89-95.
- J. A. Bloom, 1981. Long-Range Generation Planning with limited energy and storage units: Part 1 and 2, **Technical report 486 and 487**, School of operating research and industrial engineering, Cornell University.
- R. Billinton and R. N. Allan, 1996. **Reliability Evaluation of Power Systems**. New York, NY: Plenum Press.
- Xiaomin Bai and S. M. Shahidehpour, 1996. "Hydro-thermal, scheduling by tabu search and decomposition method." **IEEE Trans Power Systems**, Vol. 11, No. 2: 968-974.

7. Appendix

Table A The recursive algorithm for capacity model building

MW on outage	The cumulative probability of outage				
	Original LDC	ELDC With Unit 1 FOR	ELDC With Unit 2 FOR	...	ELDC With Unit NG FOR
0	$LDC(0)$	$ELDC_0(0)$	$ELDC_0(0)$	...	$ELDC_0(0)$
ST	$LDC(ST)$	$ELDC_1(ST) = (1 - FOR_1 \times ELDC_0(ST)) + FOR_1(ELDC_0(0))$	$ELDC_2(ST) = (1 - FOR_2 \times ELDC_1(ST)) + FOR_2(ELDC_1(0))$	...	$ELDC_{NG}(ST) = (1 - FOR_{NG} \times ELDC_{NG-1}(ST)) + FOR_{NG}(ELDC_{NG-1}(0))$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$
P_{G1}	$LDC(P_{G1})$	$ELDC_1(ST) = (1 - FOR_1 \times ELDC_0(P_{G1})) + FOR_1(ELDC_0(0))$	$ELDC_2(ST) = (1 - FOR_2 \times ELDC_1(P_{G1})) + FOR_2(ELDC_1(0))$	...	$ELDC_{NG}(P_{G1}) = (1 - FOR_{NG} \times ELDC_{NG-1}(P_{G1})) + FOR_{NG}(ELDC_{NG-1}(P_{G1} - P_{GNG}))$
$P_{G1} + ST$	$LDC(P_{G1} + ST)$	$ELDC_1(ST) = (1 - FOR_1 \times ELDC_0(P_{G1} + ST)) + FOR_1(ELDC_0(ST))$	$ELDC_2(ST) = (1 - FOR_2 \times ELDC_1(P_{G1} + ST)) + FOR_2(ELDC_1(0))$	...	$ELDC_{NG}(P_{G1} + ST) = (1 - FOR_{NG} \times ELDC_{NG-1}(P_{G1} + ST)) + FOR_{NG}(ELDC_{NG-1}(P_{G1} + ST - P_{GNG}))$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$
P_{G2}	$LDC(P_{G2})$	$ELDC_1(ST) = (1 - FOR_1 \times ELDC_0(P_{G2})) + FOR_1(ELDC_0(P_{G2} - P_{G1}))$	$ELDC_2(ST) = (1 - FOR_2 \times ELDC_1(P_{G2})) + FOR_2(ELDC_1(0))$	...	$ELDC_{NG}(P_{G2}) = (1 - FOR_{NG} \times ELDC_{NG-1}(P_{G2})) + FOR_{NG}(ELDC_{NG-1}(P_{G2} - P_{GNG}))$
$P_{G2} + ST$	$LDC(P_{G2} + ST)$	$ELDC_1(ST) = (1 - FOR_1 \times ELDC_0(P_{G2} + ST)) + FOR_1(ELDC_0(P_{G2} + ST - P_{G1}))$	$ELDC_2(ST) = (1 - FOR_2 \times ELDC_1(P_{G2} + ST)) + FOR_2(ELDC_1(ST))$	...	$ELDC_{NG}(P_{G2} + ST) = (1 - FOR_{NG} \times ELDC_{NG-1}(P_{G2} + ST)) + FOR_{NG}(ELDC_{NG-1}(P_{G2} + ST - P_{GNG}))$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$

การประมาณค่าอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงและมลพิษทางอากาศ โดยใช้เทคโนโลยี

ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก/ระบบติดตามยานพาหนะ

ESTIMATION OF FUEL CONSUMPTION AND EMISSION BY GPS/VEHICLE TRACKING SYSTEM

ดร. ศักดิ์ดา พรณไวย ¹

นายชาญเวทย์ หริพ่าย ²

นายจักรพันธ์ ทัพพวา ³

¹ วิศวกร 7 การทางพิเศษแห่งประเทศไทย Email: p.sakda@exat.co.th

อาจารย์พิเศษภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² วิศวกร 5 การทางพิเศษแห่งประเทศไทย E-mail : h_charnwat@yahoo.com

³ วิศวกร 5 การทางพิเศษแห่งประเทศไทย E-mail : t_chakrapan@hotmail.com

บทคัดย่อ

การวางแผนการเดินทางให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องใช้ระบบคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง และแบบจำลองที่มีความเที่ยงตรงสูง สำหรับการบริหารจัดการด้านระบบการจราจร/ขนส่ง ได้มีการนำระบบจราจรอัจฉริยะ (Intelligent Transport System: ITS) มาประยุกต์ใช้งานด้านการศึกษาสภาพจราจรมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งการใช้ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกและระบบติดตามยานพาหนะเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นำมาใช้เพื่อการเก็บข้อมูลและติดตามรถยนต์ที่ใช้ทดสอบ (Probe Vehicles) โดยข้อมูลที่ได้จะมีความละเอียดระดับ 1 วินาที ประกอบด้วยข้อมูล ความเร็ว เวลา และตำแหน่งของรถยนต์ที่ใช้ทดสอบ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาระยะเวลา และระยะทางในการเดินทาง (Travel Time & Distance Trajectory) เพื่อศึกษารูปแบบหรือพฤติกรรมจราจร ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้รถยนต์ทดสอบขับขึ้นบนทางพิเศษ และถนนระดับดินเพื่อนำมาวิเคราะห์หาระยะเวลาการเดินทางเฉลี่ย ความเร็วเฉลี่ย พฤติกรรมการเร่งความเร็ว การลดความเร็ว การปล่อยก๊าซพิษและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน โดยใช้แบบจำลอง Power-Based Motor-Vehicle Models เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการเดินทางและผลประโยชน์จากการใช้ทางพิเศษกับถนนระดับดิน จากผลการทดสอบพบว่าค่าการปล่อยก๊าซพิษ และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสามารถนำผลลัพธ์มาใช้งานในเชิงเปรียบเทียบได้ ซึ่งพบว่าอัตราสิ้นเปลืองและค่ามลพิษทางอากาศในการขับขี่บนถนนระดับดินมีค่ามากกว่าการขับขี่บนทางพิเศษ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลอง Power-Based Motor-Vehicle Models จำเป็นจะต้องมีการปรับแก้ค่ากำหนดใช้งานของแบบจำลองเพื่อให้สะท้อนสภาพการเดินทางบนทางพิเศษและถนนระดับดินของประเทศไทยต่อไป

คำสำคัญ: ระบบจราจรอัจฉริยะ, แบบจำลองการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง/การปล่อยมลพิษ, ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก และระบบติดตามยานพาหนะ

ABSTRACT

Intelligent trip planning system requires advanced computers, electrical technologies and robust traffic models. A number of Intelligent Transport System (ITS) applications are increasingly used to collect traffic data. In this study, Global Positioning System (GPS) or Vehicle Tracking System was adapted for data collection. Selected six probe vehicles were equipped with GPS and data-logger to gather second-by-second travel data such as speed, time and location. The vehicles were tested to travel on the selected parallel routes, which are expressway and at-grade routes. The paper examined travel time and distance trajectories and driving cycle to estimate instant fuel consumption and pollutant emissions using the Power-Based Motor-Vehicle models. Second-by-second fuel consumption and pollutant emissions were then estimated. The results showed that fuel consumption and emission outputs traveled on the expressway route were lower than those traveled on the at-grade route. However, the Power-Based models are required careful calibration and validation to replicate Thailand's traffic conditions.

KEYWORDS: ITS, Fuel consumption/Emission model, GPS and Tracking system

1. ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบัน การทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) ได้เปิดให้บริการทางพิเศษแล้วกว่า 200 กิโลเมตร มีผู้ใช้ทางเฉลี่ยวันละประมาณ 1.2 ล้านเที่ยว และมีแนวโน้มการใช้บริการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง กทพ. ได้ให้ความสำคัญเกี่ยวกับระยะเวลาเดินทางและประโยชน์ของการใช้ทางพิเศษ จึงดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบการประหยัดระยะเวลาในการเดินทางและอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษ เปรียบเทียบกับถนนระดับดินโดยใช้เทคโนโลยีระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global Positioning System: GPS) และระบบติดตามยานพาหนะ (Vehicle Tracking System) ซึ่งเทคโนโลยีนี้เป็นหนึ่งในการพัฒนาระบบจราจรอัจฉริยะที่ กทพ. กำลังดำเนินการศึกษาอยู่ในปัจจุบัน โดยการใช้เทคโนโลยี GPS และ Vehicle Tracking System ทำให้สามารถวิเคราะห์รูปแบบหรือพฤติกรรมรถที่ขึ้นทางพิเศษและบนถนนระดับดิน นอกจากความเร็ว (Speed) สถานที่และเวลา (Place & Time) ความเร่ง (Acceleration) ณ ขณะเดินทาง การวิจัยครั้งนี้ยังได้ทำการศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Consumption) และมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้น (i.e. CO, CO₂, HC, NOx) โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษรวมทั้งประโยชน์ทางตรงจากการใช้ระบบทางพิเศษเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ใช้ถนนระดับดิน

2. เส้นทางทดสอบที่ศึกษา

การศึกษานี้ได้กำหนดทางพิเศษฉลองรัชใช้เป็นเส้นทางทดสอบ เนื่องจากเส้นทางพิเศษกับเส้นทางบนถนนระดับดินเป็นเส้นทางที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยการสำรวจข้อมูลจะสำรวจ ช่วงเวลาเร่งด่วนตอนเช้า 7:00-9:00 น.(A.M. peak) ในวันทำงาน โดยเส้นทางทดสอบมีรายละเอียดดังนี้



ภาพประกอบ 1 เส้นทางทดสอบ

ขาเข้าเมือง (จากรามอินทรา - พระราม 9) และขาออกเมือง ใช้เส้นทางเดียวกัน (ดังภาพประกอบ 1)

2.1 บนทางพิเศษฉลองรัช จุดเริ่มต้นทดสอบที่ปั้มน้ำมัน ปตท. ด้านข้างถนนประดิษฐ์มนูธรรม บริเวณใกล้ทางต่างระดับรามอินทราแล้ววิ่งไปกลับรถที่ได้ทางพิเศษติดถนนรามอินทราวิ่งไปตามถนนประดิษฐ์มนูธรรม แล้วขึ้นทางด่วนรามอินทรา ผ่านถนนลาดพร้าว ถนนประชาอุทิศ แล้วลงทางพิเศษที่ด่านพระราม 9(2) ไปตามถนนประดิษฐ์มนูธรรมถึงถนนพระราม 9 แล้วเลี้ยวซ้ายไปตามแนวถนนพระราม 9 ประมาณ 700 เมตรถึงสามแยกถนนเพชรพระรามแล้วเลี้ยวขวาไปอีก 400 เมตร แล้วกลับรถเพื่อไปที่จุดปลายทางที่ปั้มน้ำมันจาก ซอยศูนย์วิจัย 14

2.2 ถนนระดับดิน จุดเริ่มต้นทดสอบที่ปั้มน้ำมัน ปตท. ด้านข้างถนนประดิษฐ์มนูธรรมบริเวณใกล้ทางต่างระดับรามอินทราแล้ววิ่งไปกลับรถ ที่ได้ทางพิเศษติดถนนรามอินทรา วิ่งไปตามถนนประดิษฐ์มนูธรรม ผ่านถนนเกษตร - นวมินทร์, ถนนลาดพร้าว, ถนนประชาอุทิศ และผ่านศูนย์ควบคุมพิเศษฉลองรัช (CCB3) ถึงถนนพระราม 9 แล้วเลี้ยวซ้ายไปตามแนวถนนพระราม 9 ประมาณ 700 เมตร ถึงสามแยกถนนเพชรพระรามแล้วเลี้ยวขวาไปอีก 400 เมตร แล้วกลับรถเพื่อไปที่จุดปลายทางที่ปั้มน้ำมันจากบริเวณซอยศูนย์วิจัย 14

3. วิธีการเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลจะใช้อุปกรณ์ GPS แบบ Off-line (Data Logger) ซึ่งจะถ่ายโอนข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ ภายหลังการทดสอบในสนามแล้วเสร็จในทันที หลังจากนั้นจะนำข้อมูลมาประมวลผลและแสดง ผลลัพธ์รูปแบบลักษณะต่างๆ ซึ่งได้แก่ การประหยัดระยะเวลาในการเดินทาง การประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง การลดปริมาณก๊าซที่ก่อให้เกิดมลพิษ และการลดค่าใช้จ่ายในการเดินทาง

3.1 ยานพาหนะที่ใช้ทดสอบ

การเก็บข้อมูลในครั้งนี้ทำการเก็บข้อมูลในช่วงเปิดภาคเรียน ระหว่างวันที่ 1-30 มิถุนายน 2551 โดยใช้ยานพาหนะ 6 คัน ซึ่งรถที่ใช้ทดสอบดังกล่าวเป็นรถยนต์นั่งส่วนบุคคล 3 รุ่น แตกต่าง โดยทำการเก็บข้อมูลเส้นทางละ 30 เที่ยว

3.2 การตั้งค่าและติดตั้งอุปกรณ์ GPS ในการเก็บข้อมูล

ก่อนที่จะนำอุปกรณ์ GPS ไปเก็บข้อมูลในสนามจะต้องทำการตั้งค่าผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป โดยนำอุปกรณ์ GPS มาต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งได้ลงโปรแกรมสำเร็จรูปของอุปกรณ์ GPS แล้วและตั้งค่าให้เก็บข้อมูลทุก 1 วินาที โดยตั้งค่าให้เก็บข้อมูล พิกัด เวลา วัน/เดือน/ปี และความเร็ว

สำหรับอุปกรณ์ GPS ที่ใช้ทดสอบนั้นมีส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ GPS Antenna, กล่อง Data Logger, สายชาร์จไฟในรถยนต์ และสาย USB ซึ่งเมื่อนำมาติดตั้งในรถยนต์ทดสอบจะติดตั้งส่วน GPS Antenna ซึ่งเป็นแม่เหล็กไว้บนหลังการด ส่วนกล่อง Data Logger จะติดตั้งไว้ภายในรถโดยใช้ไฟจากสายชาร์จในรถยนต์หรือถ่านชาร์จขนาด AA ที่มีสำรองอยู่ภายในแล้ว ซึ่งการติดตั้งภายในรถทดสอบ

3.3 การถ่ายโอนข้อมูล

ดำเนินการโดยเชื่อมต่ออุปกรณ์ GPS กับคอมพิวเตอร์ทาง USB และถ่ายโอนข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งรูปแบบข้อมูลสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบตาราง ในโปรแกรม Excel ได้

4. การประมาณค่ามลพิษและการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

การศึกษาครั้งนี้จะทำการประเมินอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงและมลพิษทางอากาศโดยใช้แบบจำลอง Power-Based Motor-Vehicle Models (Dia, H., et.al. (2006)) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงและมลพิษของรถยนต์ สำหรับค่าของการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงและมลพิษ (CO , CO_2 , HC , NO_x) สามารถคำนวณได้จากสมการ (1) และ (2)

$$\frac{dE(X)}{dt} = \alpha + \beta_1 R_T v + \left[\frac{\beta_2 M a^2 v}{1000} \right]_{a>0}, R_T > 0 \quad (1)$$

$$\frac{dE(X)}{dt} = \alpha, R_T \leq 0 \quad (2)$$

โดยที่

$E(X)$: อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงหรืออัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศ (ml/sec หรือ g/sec)

R_T : แรงทั้งหมดที่ใช้ในการขับเคลื่อนยานพาหนะ (kN)

M : น้ำหนักของยานพาหนะ (kg)

α : อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงหรืออัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศขณะรถหยุดนิ่ง (ml/sec หรือ g/sec)

β_1 : สมรรถภาพที่ 1 ของเครื่องยนต์ โดยจะสัมพันธ์กับการบริโภคเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่ใช้พลังงาน

β_2 : สมรรถภาพที่ 2 ของเครื่องยนต์ โดยจะสัมพันธ์กับการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในระหว่างที่มีการเร่งความเร็วขึ้น

- v : อัตราความเร็ว (กม./ชม.)
a : อัตราความเร่ง (ม./วินาที²)

5. มูลค่าเวลาและการก่้าจัดมลพิษ

การเดินทางโดยปกติผู้เดินทางจะต้องเสียค่าใช้จ่ายที่เกิดจากค่าใช้จ่ายจากการใช้รถ (Vehicle Operating Cost: VOC) เช่น ค่าพลังงานเชื้อเพลิง ค่าสึกหรอ เป็นต้น และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากเวลาในการเดินทาง (Value of Time: VOT) สำหรับค่าผ่านทางพิเศษเป็นค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมที่เกิดขึ้นสำหรับผู้เลือกใช้บริการทางพิเศษ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดจะถูกแปลงเป็นเป็นค่าใช้จ่ายโดยรวม (Generalized Cost) ที่มีหน่วยเป็น “บาท” โดยการตัดสินใจเลือกใช้บริการของผู้เดินทางแต่ละกลุ่มขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัย เช่น รายได้ เงินเดือน และมูลค่าเวลาของปัจเจกบุคคล เป็นต้น โดยเฉพาะกลุ่มผู้เดินทางที่มีรายได้และมูลค่าเวลาสูงจะมีการตัดสินใจเลือกใช้บริการที่แตกต่างกันออกไป

- ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน 95 เท่ากับ 42.09 บาท/ลิตร (จำหน่ายโดย ปตท. ราคาน้ำมันขายปลีก กทม. และปริมณฑล วันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2551)
- มูลค่าเวลา เท่ากับ 77.84 บาท/PCU-ชั่วโมง

การประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสิ่งแวดล้อม

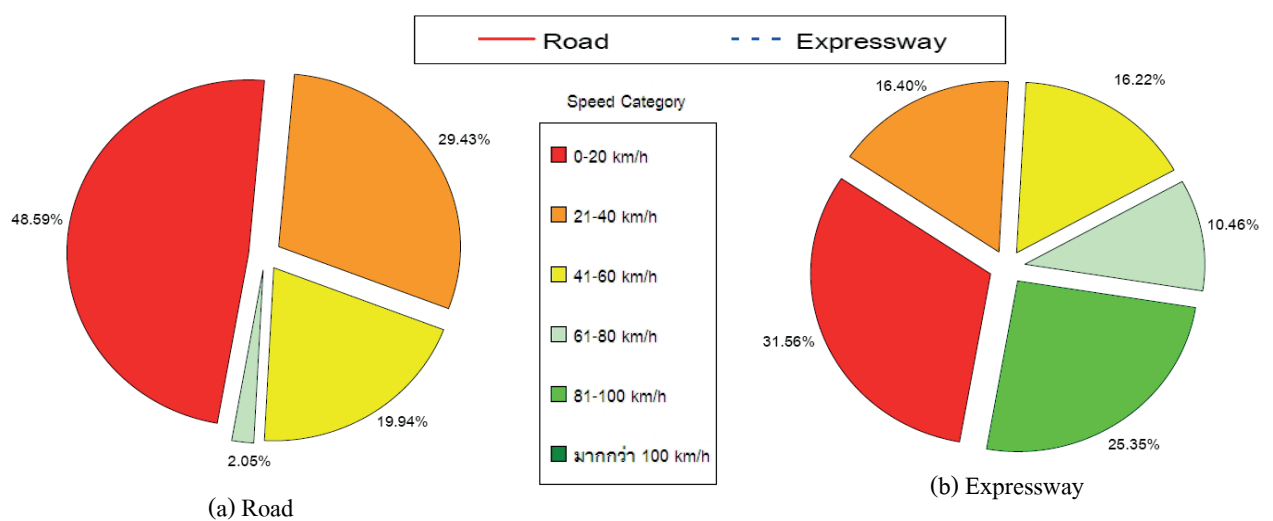
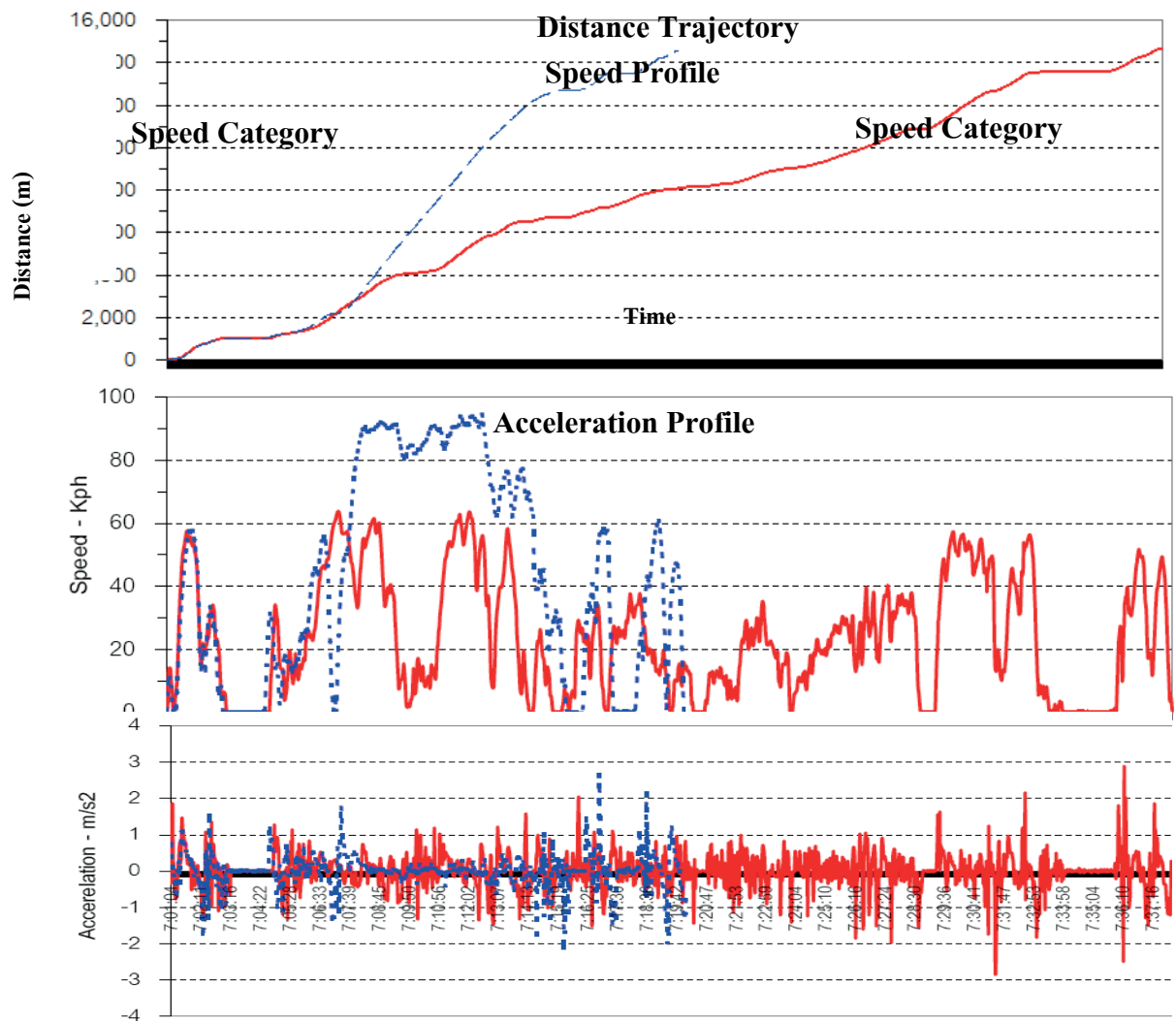
จากการศึกษาด้านค่าใช้จ่ายในการก่้าจัดมลพิษทางอากาศโดย Victoria Transport Policy Institute (Litman, T. 1999) ประเทศออสเตรเลีย พบว่า ค่าใช้จ่ายในการก่้าจัดมลพิษทางอากาศสามารถสรุปได้ดังนี้

- NO_x เท่ากับ 15,419 US \$/ton (498.86 บาท/กก.)
- CO เท่ากับ 435 US \$/ton (14.07 บาท/กก.)
- HC เท่ากับ 0.0008 Euros/kg. (0.04 บาท/กก.)
- CO₂ เท่ากับ 18.13 US \$/ton (0.59 บาท/กก.)

สำหรับการปล่อยมลพิษทางอากาศ (CO, CO₂, HC, NO_x) จากรถยนต์ที่เกิดจากการขับขึ้นตามสภาพการจราจรนั้น พบว่า สภาพทางพิเศษโดยทั่วไปจะมีส่วนช่วยลดมลพิษทางอากาศได้มาก เนื่องจากลักษณะการขับขึ้นและสภาพการจราจรบนทางพิเศษสามารถทำความเร็วได้ในระดับ 60 – 80 กม./ชม. และไม่มีสภาพการจราจรแบบ Stop-and-go condition มากเหมือนสภาพการจราจรบนถนนระดับดินที่จำเป็นต้องเร่งความเร็วหรือหยุดและเร่งความเร็วบ่อยครั้ง ลักษณะดังกล่าวทำให้เครื่องยนต์ปล่อยมลพิษทางอากาศอย่างมาก (Panwai, S. and Dia, H. 2006)

6. ผลการทดสอบ

เส้นทางทดสอบทางพิเศษคลองรัช ช่วงรามอินทรา-พระราม 9 (ถนนประดิษฐ์มนูธรรม) ทำการเก็บข้อมูลช่วงเวลาเร่งด่วนในช่วงเช้า (เวลา 07:00-09:00 น.) ในวันทำงาน พบว่าเข้าเมืองรถทดสอบที่ใช้ทางพิเศษคลองรัชสามารถถึงจุดปลายทางได้เร็วกว่ารถทดสอบที่ใช้ถนนประดิษฐ์มนูธรรม รายละเอียดดังรูปที่ 2 และตาราง 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ทางพิเศษประหยัดระยะเวลาการเดินทางได้ประมาณ 16 นาที หรือ ประมาณร้อยละ 43 ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ประมาณร้อยละ 11.7 ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยรวมประมาณ 29 บาท หรือ ร้อยละ 25 ลดมลพิษทางอากาศ (CO, CO₂, HC, NO_x) ได้ร้อยละ 12 – 39



ภาพประกอบ 2 Distance Trajectory (บน) Speed Profile & Acceleration (กลาง) และ Speed Category (ล่าง) ของถนนระดับดิน (ถนนประดิษฐ์มนูธรรม) และทางพิเศษสองริ้ว - ขาเข้าเมือง (A.M. Peak, วันทำงาน)

ตาราง 1 เปรียบเทียบมลพิษทางอากาศและการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงบนเส้นทางทดสอบ

	ถนนระดับดิน (1)	ทางพิเศษ (2)	% ความแตกต่าง (3) = {(1) - (2)} * 100 / (1)
ขาเข้าเมือง			
ระยะทางการเดินทาง (กม.)	14.67	14.55	0.8
สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร)	1.57	1.39	11.7
ระยะเวลาการเดินทาง (นาที)	38.4	22.0	42.7
อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (กม.ต่อลิตร)	9.37	10.51	-12.1
ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง			
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง (บาท)	66	58	11.7
ค่าเวลาในการเดินทาง (บาท)	50	29	42.7
รวมค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท)	116	87	25.0
ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (บาท/กม.)	7.90	5.98	24.3
มลพิษทางอากาศ			
ค่า NOx (กก.)	0.0058	0.0045	22.3
ค่า CO (กก.)	0.1618	0.1232	23.9
ค่า HC (กก.)	0.0062	0.0038	38.6
ค่า CO ₂ (กก.)	3.9272	3.4687	11.7
ขาออกเมือง			
ระยะทางการเดินทาง (กม.)	15.25	15.32	-0.5
สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร)	1.50	1.62	-8.0
ระยะเวลาการเดินทาง (นาที)	30.0	22.8	24.0
อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (กม.ต่อลิตร)	10.23	9.50	7.1
ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง			
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง (บาท)	63	68	-8.0
ค่าเวลาในการเดินทาง (บาท)	39	30	24.0
รวมค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท)	102	98	4.2
ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (บาท/กม.)	6.67	6.37	4.5
มลพิษทางอากาศ			
ค่า NOx (กก.)	0.0053	0.0042	21.3
ค่า CO (กก.)	0.1438	0.1124	21.8
ค่า HC (กก.)	0.0049	0.0038	22.9
ค่า CO ₂ (กก.)	3.7423	4.0412	-8.0

หมายเหตุ: ราคาน้ำมันเบนซิน 95 เท่ากับ 42.09 บาท/ลิตร (จำหน่ายโดย ปตท. ราคาน้ำมันขายปลีก กทม.และปริมณฑล วันที่ 15 มิ.ย. พ.ศ. 2551) มูลค่าเวลาของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลเท่ากับ 77.84 บาท/PCU-ชั่วโมง.

ในกรณีของขาออกเมือง ช่วงเวลาเร่งด่วนในช่วงเช้า รถทดสอบที่ใช้ทางพิเศษคลองรัชและรถทดสอบที่ใช้ถนนประดิษฐ์มนูธรรมใช้เวลาในการเดินทางไม่ต่างกันมากนัก โดยที่รถทดสอบที่ใช้ทางพิเศษคลองรัชจะถึงจุดหมายปลายทางเร็วกว่าประมาณ 7 นาที หรือร้อยละ 24 ค่าใช้จ่ายในการเดินทางไม่ต่างกันมากนัก แต่การใช้ทางพิเศษคลองรัชมีส่วนช่วยลดมลพิษทางอากาศได้มาก กล่าวคือประมาณร้อยละ 21 – 23 รายละเอียดแสดงในตาราง 1

จากการสำรวจพบว่า ในช่วงเวลาเร่งด่วนในช่วงเช้า วันทำงานพบว่า ปริมาณจราจรส่วนใหญ่มีทิศทางของการเดินทางเข้าเมือง เป็นผลทำให้ปริมาณจราจรบนช่วงถนนประดิษฐ์มนูธรรมมีความหนาแน่นสูง เป็นผลทำให้การใช้ทางพิเศษคลองรัช ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินทางได้อย่างมาก และเนื่องจากสภาพการคับขันบนทางพิเศษคลองรัชมีความคล่องตัว (ทั้งขาเข้าเมืองและออกเมือง) ส่งผลให้รถยนต์ทดสอบสามารถที่จะขับขึ้นได้อย่างสะดวกสบายกว่า กล่าวคือสามารถขับขึ้นโดยไม่ต้องเปลี่ยนระดับความเร็วบ่อยครั้ง หรือการขับขึ้นที่มีลักษณะที่หยุดและเร่งความเร็ว น้อยกว่าการขับขึ้นบนถนนประดิษฐ์มนูธรรม ทำให้ช่วยลดมลพิษทางอากาศได้อย่างมาก

7. สรุปผล

การใช้เทคโนโลยี GPS และ Vehicle Tracking System ทำให้สามารถวิเคราะห์รูปแบบหรือพฤติกรรม การขับขึ้นบนทางพิเศษและบนถนนระดับดินได้ ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถบันทึกข้อมูลความเร็ว ความเร่ง เวลาและสถานที่ ณ ขณะเดินทาง ทำให้สามารถวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงและมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้น (CO, CO₂, HC, NOx) ได้ จากการศึกษพบว่า การขับขึ้นในสภาพการจราจรที่ต้องเร่งความเร็ว หรือหยุดและเร่งความเร็วบ่อยครั้ง อย่างเช่นสภาพการจราจรบนถนนระดับดิน ลักษณะดังกล่าวทำให้เครื่องยนต์ปล่อยมลพิษทางอากาศและสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Panwai, S. and Dia, H. (2006) และ Dia, H., et.al. (2006)

อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ยังจำเป็นต้องมีการปรับแก้แบบจำลอง (Model Calibration) และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) โดยใช้ข้อมูลจริงจากสนามอีกครั้ง เพื่อให้สะท้อนสภาพการเดินทางบนทางพิเศษและถนนระดับดินของประเทศไทยอย่างแท้จริง และจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลให้ครอบคลุมรูปแบบหรือพฤติกรรม การขับขึ้นในลักษณะต่างๆ

8. รายการอ้างอิง

- Litman, T. 1999. **Comparing Transportation Emissions Reduction Strategies**, Victoria Transport Policy Institute.
- Panwai, S. and Dia, H. 2006. **Aggressive Driver Behaviour - Lane Changing and Overtaking**. Catalyst Program, Australian Broadcasting Cooperation (ABC) Channel, Australia Retrieved 13:45, 13 July 2009, <http://www.abc.net.au/catalyst/stories/s1698662.htm>
- Dia, H., Panwai, S., Boongrapue, N., Tu Ton and Smith, N. 2006. **Comparative Evaluation of Power-Based Environmental Emissions Models**. Proceedings of the 9th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2006), September 17-20, 2006, Toronto Marriott Downtown Eaton Centre, Toronto, Canada, pp. 1251-1256.

การป้องกันการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือทางด้านคุณภาพ

PREVENTION OF DEFECTS IN MANUFACTURING PROCESS OF AUTOMOTIVE PART BY APPLYING QUALITY TOOLS

สุพัตรา เกษราพงศ์

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail : suphattra.ke@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โดยเลือกศึกษาชิ้นส่วน A01 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนหลักและมีของเสียเกิดขึ้นสูงสุดในปัจจุบัน งานวิจัยเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตโดยใช้แผนภูมิการผลิต (Production Process Chart) และวิเคราะห์รายการข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการโดยการระดมสมอง (Brainstorming Technique) ซึ่งอาศัยข้อมูลจากอดีตและข้อมูลในปัจจุบันโดยใช้แผ่นเก็บข้อมูล (Check Sheet) ทำการสำรวจและสัมภาษณ์พนักงานในสายการผลิต และทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยประยุกต์ใช้ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) และเทคนิควิเคราะห์ Why-Why เพื่อเลือกสาเหตุหลัก หลังจากนั้นจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุเพื่อแก้ไขโดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของกระบวนการ (Process Failure Mode and Effect Analysis: PFMEA) โดยพิจารณาจากค่าลำดับความสำคัญของสาเหตุ (Risk Priority Number : RPN) โดยทำการปรับปรุงที่ระดับ RPN สูงกว่า 100 ตามสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น จัดทำระบบ Poka-Yoke จัดทำเอกสารวิธีปฏิบัติงาน เอกสาร Q-Point ปรับเปลี่ยนวิธีปฏิบัติงานให้เหมาะสมและอบรมหน้าสถานีงาน ผลลัพธ์จากการปรับปรุงพบว่าเปอร์เซ็นต์ของของเสียลดลงจากเดิมจาก 4.2172% เป็น 0.2796% และ 0.0537% ในการปรับปรุงครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การป้องกันของเสีย กระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องมือคุณภาพ

ABSTRACT

The purpose of this paper was to prevent defects in manufacturing process of automotive part by selecting part A01. It is main part of the faculty and brings about the highest defects at present. This research starts from studying production process by using Production Process Chart and analyzing characteristics of defects by Brainstorming technique. We used historical data and studied present data by using Check Sheet to survey and interview with operators in the line production. And then, we analyzed the causes of defects by using Cause and Effect Diagram and Why-Why Analysis to choose root causes. After that, we applied Process Failure Mode and Effect Analysis: PFMEA by considering Risk Priority Number: RPN to improve the causes

of defects which have RPN higher than 100 such as making Poka-Yoke system, Work Instruction: WI documents, Q-Point documents, adjusting method of work and on-the-job training. The result of improving showed that after the first and the second improvement, defect ratio reduces from 4.2172% to 0.2796% and 0.0537% respectively.

KEYWORDS : Prevent defects, Manufacturing process of automotive part, Quality tools

1. บทนำ

สภาวะเศรษฐกิจในปัจจุบันทำให้อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศต้องมีการปรับตัวเพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน โดยเฉพาะการผลิตชิ้นส่วนให้มีคุณภาพ เนื่องจากผู้ผลิตยานยนต์หลายๆ บริษัทตัดสินใจที่จะเลือกผู้ผลิตชิ้นส่วนที่มีคุณภาพโดยกำหนดให้ผู้ผลิตชิ้นส่วนต้องได้รับการรับรองมาตรฐานระบบคุณภาพ ISO/TS 16949 เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจในระบบการทำงานและการควบคุมคุณภาพให้เป็นที่เชื่อถือในมาตรฐานดังกล่าวมีข้อกำหนดที่มุ่งเน้นการป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาของเสีย (David Hoyle, 2005) ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนจำเป็นต้องให้ความสำคัญในเรื่องการป้องกันของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเพื่อได้รับการรับรองมาตรฐาน ส่งผลทำให้เพิ่มความสามารถในการแข่งขันและลดความเสี่ยงที่ทำให้ลูกค้าเกิดความไม่พึงพอใจ ทำให้มีงานวิจัยจำนวนมาก เช่น วชิราภรณ์ เศรษฐนันท์ (2543) กิตติศักดิ์ อนุรักษกุล (2545) และ Andre and Paulo (2008) ให้ความสำคัญในเรื่องระบบคุณภาพในอุตสาหกรรมยานยนต์โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือทางด้านคุณภาพเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เหมือนกับงานวิจัยนี้ที่เห็นความสำคัญในเรื่องการป้องกันการเกิดของเสียในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากการผลิตของเสียเป็นตัวสะท้อนขีดความสามารถและโอกาสทางการแข่งขัน งานวิจัยจึงเลือกศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วนของโรงงานกรณีศึกษาแห่งหนึ่งที่ทำ การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งปัจจุบันประสบกับปัญหาด้านคุณภาพของชิ้นส่วน เนื่องจากมีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเป็นปริมาณมาก (สุพัตรา เกษราพงศ์, 2550) โดยเฉพาะชิ้นส่วน A01 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ของเสียสูงถึง 4.2172% ดังตาราง 1 ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ และเมื่อของเสียถึงมือลูกค้าทำให้ลูกค้าลดระดับความเชื่อถือ

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

ประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพในการค้นหาปัญหาและสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสีย และทำการปรับปรุงแก้ไขตามสาเหตุที่เกิดขึ้น โดยใช้เทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหการเพื่อป้องกันการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน A01 ของโรงงานกรณีศึกษา

3. วิธีการวิจัย

ขั้นตอนในการวิจัยประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก คือ กำหนดชิ้นส่วนที่ศึกษา ศึกษากระบวนการ วิเคราะห์รายการข้อบกพร่อง วิเคราะห์สาเหตุ จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ และปรับปรุงแก้ไข

3.1 กำหนดชิ้นส่วนที่ทำการศึกษา

การกำหนดชิ้นส่วนที่ใช้ในการศึกษาใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยพิจารณาจาก 2 เหตุผลหลัก คือ เป็นชิ้นส่วนหลักของโรงงานกรณีศึกษาซึ่งมีการผลิตต่อเนื่องและมีปัญหาทางด้านคุณภาพ คือ

มีเปอร์เซ็นต์ของเสียสูง ดังนั้นจึงเลือกศึกษาชิ้นส่วน A01 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนโลหะอยู่ด้านล่างของรถยนต์มีกล่องทำหน้าทีลือกถ้าน้ำมัน เมื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียก่อนปรับปรุง โดยใช้แผนตรวจสอบ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ของเสียสูงถึง 4.2172% หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์และจำแนกประเภทของเสียโดยแบ่งลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นออกเป็น 4 ประเภท คือ ของเสียที่ทำให้ขนาดของชิ้นงานไม่ได้มาตรฐาน (Dimension) ของเสียที่ทำให้ลักษณะภายนอกไม่ได้มาตรฐาน (Appearance) ของเสียที่ทำให้สูญเสียชิ้นงาน (Wrong Part) และของเสียทำให้ชิ้นงานสูญเสียหน้าที่หลัก (Function) ดังตาราง 1

ตาราง 1 ข้อมูลปริมาณการผลิตและเปอร์เซ็นต์ของเสียในช่วงเดือน มกราคม-ธันวาคม ปี พ.ศ.2550

รายการ	ปริมาณ (ชิ้น)	ลักษณะของเสีย	ปริมาณของเสีย (ชิ้น)
ปริมาณการผลิต	280,520		
ปริมาณของเสีย	11,830	Dimension	560
		Appearance	5,920
		Wrong Part	3,360
		Function	1,990
% ของเสีย	4.2172 %	Dimension	0.1996
		Appearance	2.1104
		Wrong Part	1.1978
		Function	0.7094

3.2 ศึกษากระบวนการผลิต

ศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วน A01 โดยใช้แผนภูมิกระบวนการผลิต (Branes,R.M.,1980) เพื่อวิเคราะห์ขั้นตอนในการทำงาน และวิเคราะห์รายการตรวจสอบคุณภาพในแต่ละกระบวนการ โดยแบ่งกระบวนการผลิตออกเป็น 5 กระบวนการดังตาราง 2

ตาราง 2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วน A01 และรายการตรวจสอบคุณภาพในแต่ละกระบวนการ

กระบวนการ	รายการตรวจสอบคุณภาพ
1.Spot Nut M10	รอย Spot โดยใช้สายตาตรวจสอบตำแหน่งในการ Spot โดยรอย Spot ต้องไม่มีฟองอากาศ, ไม่มีรอยแตก และไม่ทะลุ และมี Nut M10 จำนวน 2 ตัว
2. Spot Pin-Guide	ความสมบูรณ์ที่รอย Spot โดยใช้สายตาตรวจสอบตำแหน่งในการ Spot โดยรอย Spot ต้องไม่มีฟองอากาศ ไม่มีรอยแตก ไม่เอียง และไม่ทะลุ และมี Pin-Guide 1 ตัว
3.ประกอบ Nut M8	รอยการ Tack ชิ้นงานไม่ควรมีรอยแตกหรือเป็นรูและตำแหน่งการประกอบชิ้นส่วนต้องถูกต้องและไม่เอียง มี Nut M8 จำนวน 3 ตัว
4.ประกอบ Main Assembly	Track ชิ้นงานติด การวางชิ้นส่วนถูกต้องไม่เอียง
5.เชื่อม Main Welding	ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมไม่ให้มีฟองอากาศ ไม่เกิดรอยแตก แนวเชื่อมไม่แห้วงั่ว

3.3 วิเคราะห์รายการข้อบกพร่อง

ทีมงานซึ่งประกอบด้วย ผู้จัดการ โรงงาน หัวหน้าฝ่ายวิศวกรรม หัวหน้าฝ่ายผลิต หัวหน้าฝ่ายควบคุมคุณภาพ และตัวแทนพนักงานในแต่ละฝ่ายใช้เทคนิคการระดมความคิดและ เทคนิค Why-Why เพื่อกำหนด

เป้าหมายและข้อควรระวังในการปฏิบัติงาน และทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นของแต่ละกระบวนการซึ่งจากหลักการดังกล่าวทำให้สรุปข้อบกพร่องจากการผลิตได้ 13 ข้อบกพร่องดังตาราง 3

3.4 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาในแต่ละข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นโดยการระดมความคิดของทีมงานซึ่งได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลในอดีตและอาศัยการเก็บข้อมูลจากการสังเกตการทำงานของพนักงานและการสัมภาษณ์พนักงานของแต่ละกระบวนการที่หน้าสถานีงานโดยใช้แผ่นตรวจสอบและใช้แผนภาพสาเหตุและผล (กะทชยะโฮโซดานิ, 2547) เพื่อวิเคราะห์สาเหตุในแต่ละข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นโดยแบ่งสาเหตุหลักและสาเหตุย่อย และทำการประเมินเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องโดยพิจารณาความเป็นไปได้จากสาเหตุหลัก ซึ่งสรุปสาเหตุหลักที่เป็นไปได้ที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องจากการประเมินของทีมงานดังตาราง 4

ตาราง 3 เป้าหมาย ข้อควรระวัง รายการข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ

กระบวนการ	เป้าหมาย	ข้อควรระวังในการปฏิบัติงาน	ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น
Spot Nut M10	SPOT NUT M10	การปรับตั้งกระแสไฟ	Spot Nut M10 เอียง
		สังเกตชิ้นงานก่อนปฏิบัติงาน	Spot Nut M10 กลับด้าน
Spot Pin-Guide	ยึด Pin-Guide เข้ากับชิ้นงาน	ให้สังเกตจุด Mark	Spot Pin-Guide เอียง
Nut Assembly M8	ประกอบ Nut M8	การปรับตั้งกระแสไฟ	ประกอบ Nut M8 เอียง
Main Assembly	ประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน โดยการ Tack	การปรับตั้งกระแสไฟ	Tack ชิ้นงานไม่ติด
		การวางตำแหน่งชิ้นงาน	ประกอบชิ้นส่วน เอียง
Main Welding	เชื่อมชิ้นงาน	การเดินแนวเชื่อม	เกิดฟองอากาศในแนวเชื่อม
			แนวเชื่อมแหง
			แนวเชื่อมไม่ราบเรียบ
			ความยาวแนวเชื่อมไม่ได้มาตรฐาน
		การปรับตั้งกระแสไฟ	เชื่อมทะลุ
			เกิดเม็ดไฟจากการเชื่อม
			การซึมลึกของแนวเชื่อม

3.5 จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ

ทำการประเมินความสำคัญของแต่ละสาเหตุโดยประยุกต์ใช้ PFMEA เพื่อประเมินค่า RPN ซึ่งเป็นตัวเลขแสดงความสำคัญที่เกิดจากผลคูณของความรุนแรงของผลกระทบ โอกาสที่เกิดความล้มเหลว และความสามารถในการตรวจจับซึ่งมีค่าระหว่าง 1-1000 (AIAG,B.B, 2001) (Richard,A.H,2001)และ(กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ,2547) เกณฑ์ที่จะต้องแก้ไขเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นโดยตั้งเกณฑ์ที่ RPN สูงกว่า 100 ในการแก้ไข (สุพัฒตรา เกษราพงศ์, 2550) ซึ่งเกณฑ์ที่ตั้งได้พิจารณาจากข้อกำหนดของลูกค้าและพิจารณาจากเกณฑ์ของคู่แข่ง รวมถึงพิจารณาถึงศักยภาพของทรัพยากรที่มีอยู่ในองค์กรเป็นสำคัญ ดังนั้นเมื่อทำการประเมินและคำนวณค่า RPN พบว่ารายการข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นซึ่งมีค่า RPN สูงกว่า 100 มีทั้งหมด 16 รายการจาก 21 รายการโดยที่ค่า RPN สูงที่สุดมีค่า RPN เท่ากับ 392 ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการ Main Welding ดังตาราง 4

ตาราง 4 (ต่อ)

กระบวนการ	ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น	สาเหตุหลัก	วิธีดำเนินการปรับปรุง		ค่า RPN	
			ครั้งที่		ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
	แนวเชื่อมไม่ราบเรียบ	การเดินแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ	#1	1. จัดอบรมพนักงานเรื่องการเดินแนวเชื่อม 2. ให้หัวหน้างานเชื่อมต่อสอบพนักงานอีกครั้ง 3. จัดทำใบตรวจสอบคุณภาพ	392	144
			#2	1. จัดทำเอกสาร Q-Point	144	96
			#1	1. วัดความยาวแล้วทำการ Mark จุด ก่อนปฏิบัติงาน 2. จัดทำใบตรวจสอบคุณภาพ	175	70
	ความยาวแนวเชื่อมไม่ได้มาตรฐาน	ไม่มีการกำหนดตำแหน่งระยะเชื่อม	#1	1. วิธีดำเนินการเหมือนกับการตั้งค่ากระแสไฟฟ้าสูง	270	180
			#2	1. เพิ่มการตรวจสอบใบเอกสารใบตรวจสอบคุณภาพ	180	90
			#1	1. จัดอบรมพนักงานเรื่องการเดินแนวเชื่อม 2. ให้หัวหน้างานเชื่อมต่อสอบพนักงานอีกครั้ง 3. จัดทำใบตรวจสอบคุณภาพ	378	108
	เกิดมีดีไฟจากการเชื่อม	การมีฝุ่นละอองติดที่ชิ้นงาน	#2	1. เพิ่มข้อควรระวังในเอกสารวิธีปฏิบัติงาน	108	54
			#1	1. จัดทำเอกสารวิธีการปฏิบัติงานไว้หน้าสถานีงาน 2. จัดทำใบตรวจสอบคุณภาพ	175	60
			#1	1. ให้หัวหน้าสายการผลิตปรับค่าตามใบ OPD 2. หัวหน้าสายการผลิตตรวจสอบชิ้นแรก 3. จัดทำใบตรวจสอบคุณภาพ	150	50
			-	-	90	-
Main Welding	การซึมลึกแนวเชื่อมไม่ได้มาตรฐาน	-	-	90	-	
		-	-	60	-	

3.6 ทำการปรับปรุงแก้ไขกรณีที่มีค่า RPN สูงกว่า 100

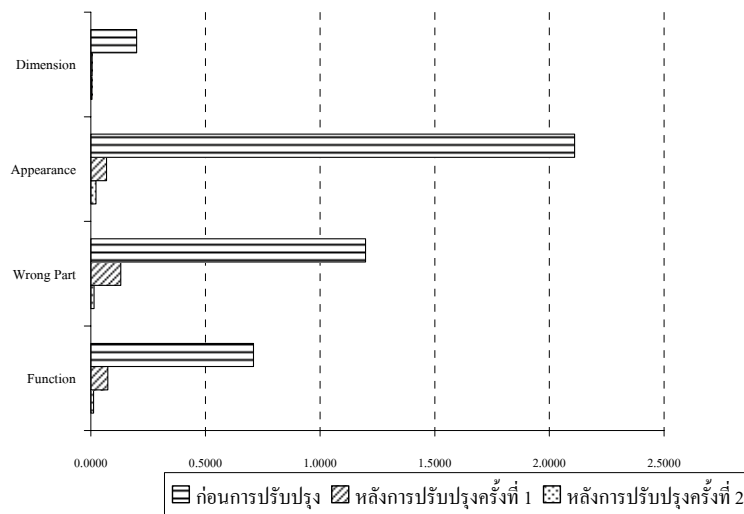
ทำการปรับปรุงเพื่อให้ระดับ RPN ต่ำกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือ 100 โดยทำการปรับปรุง 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 ปรับปรุง 16 รายการของสาเหตุที่ทำให้ค่า RPN สูงกว่า 100 หลังการปรับปรุงครั้งที่ 1 พบว่ามี 6 รายการที่มีค่า RPN ยังคงสูงกว่า 100 ทำการปรับปรุงครั้งที่ 2 ทำให้ทุกรายการมีค่า RPN ต่ำกว่า 100 ซึ่งในการปรับปรุงพิจารณาจากสาเหตุที่เกิดขึ้น เช่น จัดทำระบบ Poka-Yoke, จัดทำเอกสารวิธีปฏิบัติงาน, เอกสาร Q-Point ปรับเปลี่ยนวิธีปฏิบัติงานให้เหมาะสม, อบรมพนักงานซึ่งมีรายละเอียดดังตาราง 4

4. ผลการวิจัย

เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลของเสียก่อนและหลังการปรับปรุงครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 พบว่าหลังการปรับปรุงครั้งที่ 1 ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียช่วงเดือนมกราคม – กุมภาพันธ์ 2551 พบว่ามีชิ้นส่วนเสียจำนวน 94 ชิ้นจากการผลิตทั้งหมด 33,614 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเสีย 0.2796 โดยกระบวนการที่มีค่า RPN มากกว่า 100 ซึ่งเป็นกระบวนการที่ปรับปรุงมีของเสียเกิดขึ้น 92 ชิ้น และหลังการปรับปรุงครั้งที่ 2 ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียช่วงเดือนมีนาคม – เมษายน 2551 พบว่ามีชิ้นส่วนเสียจำนวน 22 ชิ้นจากการผลิต ทั้งหมด 41,000 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเสีย 0.0537 โดยกระบวนการที่มีค่า RPN มากกว่า 100 ซึ่งเป็นกระบวนการที่ปรับปรุงมีของเสียเกิดขึ้น 11 ชิ้น รายละเอียด และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นออกเป็น 4 ประเภท พบว่าลักษณะของเสียที่เกิดจากลักษณะภายนอกไม่ได้มาตรฐาน (Appearance) ลักษณะของเสียที่ทำให้สูญเสียชิ้นงาน (Wrong Part) ลักษณะของเสียทำให้ชิ้นงานสูญเสียหน้าที่หลัก (Function) และและลักษณะของเสียที่ทำให้ขนาดของชิ้นงานไม่ได้มาตรฐาน (Dimension) เกิดขึ้นมากที่สุดตามลำดับดัง ตาราง 5 และภาพประกอบ 1

ตาราง 5 ข้อมูลของเสียก่อนและหลังการปรับปรุงครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

ลักษณะของเสีย	ก่อนการปรับปรุง (ปริมาณการผลิต = 280,520 ชิ้น)		หลังการปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปริมาณการผลิต = 33,614 ชิ้น)		หลังการปรับปรุงครั้งที่ 2 (ปริมาณการผลิต = 41,000 ชิ้น)	
	จำนวนของเสีย	% ของเสีย	จำนวนของเสีย	% ของเสีย	จำนวนของเสีย	% ของเสีย
Dimension	560	0.1996	2	0.0059	2	0.0048
Appearance	5,920	2.1103	23	0.0684	9	0.0219
Wrong Part	3,360	1.1977	44	0.1308	6	0.0146
Function	1,990	0.7093	25	0.0743	5	0.0537
รวม	11,830	4.2172	94	0.2796	22	0.0537



ภาพประกอบ 1

5. สรุปผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางด้านคุณภาพทำให้สามารถวิเคราะห์หาลักษณะข้อบกพร่องและสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสีย และเมื่อทำการปรับปรุงสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น จัดทำระบบ Poka-Yoke, จัดทำเอกสารวิธีปฏิบัติงาน, เอกสาร Q-Point, ปรับเปลี่ยนวิธีปฏิบัติงานให้เหมาะสมและอบรมหน้าสถานีงาน ผลลัพธ์จากการปรับปรุงทำให้เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียลดลงจากเดิมจาก 4.2172% เป็น 0.2796% และ 0.0537% ในการปรับปรุงครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ (วชิราภรณ์ เศรษฐนันท์, 2543) (กิตติศักดิ์ อนุรักษกุล, 2545) และ (Andre and Paulo, 2008) ที่ประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ทำให้สามารถลดของเสียในกระบวนการผลิต

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณ รศ.ดร.เสรี เสวตเสรณี ที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย และขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่อนุเคราะห์ข้อมูล

7. รายการอ้างอิง

Andre Segismunda, Paulo Augusto Cauchica Miguel, 2008. "Failure mode and effect analysis (FMEA) in the context of risk management in new product development: A case study in an automobile company."

International Journal of Quality & Reliability Management. 25,9: 899-912.

Barnes, R.M, 1980. **Motion and Time Study.** 7th ed. New York: John Wiley and Sons.

Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motor Cooperation, 2008. **Potential Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Reference Manual.** 4th ed. n.p.

David Hoyle, 2005. **Automatic Quality System Handbook incorporation ISO/TS 16949 : 2002.** Great Britain: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Richard A.H., 1999. "How to Get More Out of Your FMEAs." **Quality Digest**. 19,6: 40-42.

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2551. **FMEA การวิเคราะห์หาการขัดข้องและผลกระทบ**. พิมพ์ครั้งที่ 1

กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมไทยเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

กิตติศักดิ์ อนุรักษ์สกุล, 2545. "การวิเคราะห์และลดของเสียในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงร่างยานยนต์ โดยใช้เทคนิค FMEA." วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กะทษยะ โฮโซทานิ, 2547. **การแก้ปัญหาแบบลิวซี : วิธีการแก้ปัญหาแบบญี่ปุ่น**. แปลโดย วีรพงษ์ เกลิมจิระรัตน์.

พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

วชิราภรณ์ เศรษฐนันท์, 2542 "การลดชิ้นส่วนของเสียในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์." วิทยานิพนธ์ปริญา

มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุพัฒตรา เกษราพงศ์, 2550. **การประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA ในการวิเคราะห์และลดของเสียในกระบวนการปั๊ม**

ขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงหลักของรถยนต์. รายงานวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยบุคลากรภายใน 1/2550

มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

การวิเคราะห์ตัวแปรทางความร้อนของอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็น

ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

THERMAL PARAMETRIC STUDY OF REFRIGERANT ACCUMULATOR DIP LINE TUNNEL BY USING MATHEMATIC SIMULATION MODEL

อมตะ ทศนภักดิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail : ottocycle33@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษาอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็นและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน อุณหภูมิแวดล้อมและจำนวนของอุโมงค์อบสีที่มีต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีและการกระจายของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีรวมทั้งศึกษาหาแนวทางจัดทำมาตรการการประหยัดพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของอุโมงค์อบสี

โดยจากการสำรวจภายในอุโมงค์อบสีพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการแห้งของสีที่เคลือบคือการกระจายของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศร้อนที่จะต้องมีความเร็วต่ำมากเพื่อให้การแห้งของสีเคลือบเป็นแบบแห้งอย่างช้าๆ และทั่วทั้งถึงสะสมสารทำความเย็นดังนั้นการอบสีเคลือบเป็นลักษณะที่ถึงสะสมสารทำความเย็นที่ผ่านการเคลือบสีแล้วเคลื่อนที่ผ่านอากาศร้อนที่เคลื่อนตัวด้วยความเร็วต่ำๆ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่บนพื้นฐานการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนพบว่าจำนวนของอุโมงค์อบสีและอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมมีผลกระทบในลักษณะแปรผันตรงต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีที่อยู่ในรูปแบบความร้อนสูญเสียจากภายในอุโมงค์อบสีสู่อากาศแวดล้อมภายนอก

ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์อุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของอากาศแวดล้อมรวมทั้งความหนาของฉนวนใยแก้วจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมในช่วง 25°C - 35°C มีผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีเฉลี่ย 1°C - 2°C
2. การมีฉนวนใยแก้วและช่องอากาศระหว่างผนังเหล็กทำให้ผลต่างของโปรไฟล์อุณหภูมิภายในมากขึ้นเฉลี่ย 1°C - 2°C ในช่วงแรกจากช่องทางเข้าของอุโมงค์อบสีและเพิ่มเป็น 3°C - 5°C ในช่วงกลางอุโมงค์อบสีและเพิ่มเป็น 6°C - 10°C ในช่วงท้ายอุโมงค์อบสี
3. ความหนาของใยแก้วที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 50 mm มีผลทำให้อุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีเพิ่มขึ้น 0.5°C - 1°C ในช่วง 3.3 m แรกและเพิ่มขึ้น 2°C - 3°C ในช่วงกลางและช่วงท้ายของอุโมงค์อบสี
4. โปรไฟล์ของอุณหภูมิของอุโมงค์อบสีจะมีความชันมากในช่วงแรกและความชันของโปรไฟล์จะลดลงจนเกือบจะคงที่ที่ตำแหน่งกลางและท้ายของอุโมงค์อบสี

5. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} - 80 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) เป็นตัวแปรที่มีผลต่ออุณหภูมิและการกระจายของอุณหภูมิน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม

คำสำคัญ : อุโมงค์อบสี อุณหภูมิ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน การนำความร้อน ฉนวนใยแก้ว

ABSTRACT

The study of refrigerant accumulator dip line tunnel and its mathematic model was conducted with objective to gain insights on the relationship of natural film coefficient of environmental air, environmental air temperature, and insulator of tunnel that effected to inside tunnel temperature and temperature distribution as well as to study to save the energy and to improve the efficiency.

The inside tunnel exploration showed that the parameters which effected to film laminated material were inside tunnel temperature and hot air velocity which must be very low velocity in order to slowly dry the whole film laminated material of the refrigerant accumulator therefore type of film laminated material fumigation was dip in very slow moving hot air. According to mathematic model based on conductive heat transfer, insulator of tunnel and environmental air temperature proportional effected to inside tunnel temperature that was in form of heat loss from inside tunnel to environmental air.

From the study and analyses of temperature and natural film coefficient of environmental air as well as glass wool insulator thickness, mathematic model give the result as follows:

1. Environmental air temperature in range $25^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$ influenced to inside tunnel temperature about $1^\circ\text{C} - 2^\circ\text{C}$
2. Glass Wool insulator and air gap increased the difference of inside temperature profile that first entry section of tunnel increased $1^\circ\text{C} - 2^\circ\text{C}$ and $3^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C}$ in middle section and $6^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}$ end section
3. The increment of glass wool insulator thickness in every 50 mm increased inside tunnel temperature in rage $0.5^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}$ in first 3.3 m of tunnel and $2^\circ\text{C} - 3^\circ\text{C}$ in middle and end section of tunnel
4. The slop of tunnel temperature profile is steep in first entry section of tunnel and declined in middle and end section of tunnel
5. The natural film coefficient of environmental air ($10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} - 80 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) was parameter which was very less influenced to temperature and temperature distribution when compare to environmental air temperature

KEYWORDS : Tunnel, Temperature, Relative humidity, Glass wool insulator

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

โรงงานผลิตถึงสะสมสารทำความเย็น (ผลิตภัณฑ์) โดยใช้ระบบสายพานลำเลียงให้ถึงสะสมสารทำความเย็นผ่าน กระบวนการชุบสี (สีดำ) เป็นลำดับแรก แล้วผ่านเข้าสู่อุโมงค์อบสีเพื่อทำให้สีที่ชุบนั่นแห้งจากการศึกษาพบว่ามักมีปัญหาเกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อน (เมษายน – มิถุนายน) เพราะอากาศโดยรอบมีอุณหภูมิสูงส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ทำให้สีที่อบไม่เรียบ (เป็นคลื่น) ทางโรงงานต้องนำผลิตภัณฑ์ที่สีไม่เรียบมาทำการลอกสี, พ่นทราย, ชุบสี, และอบสีใหม่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเป็น 2 เท่าของผลิตภัณฑ์ที่เสีย รวมทั้งวิธีจ่ายลมร้อนเข้าสู่อุโมงค์อบสีด้วยแหล่งความร้อนที่ได้จากฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำให้สูญเสียการใช้พลังงานไฟฟ้ามาก จากปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการวิจัยเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสีของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย อุณหภูมิ, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, คุณสมบัติและความหนาของฉนวนใยแก้วมีผลกระทบต่ออุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสี ซึ่งจะมีผลกระทบกับผลิตภัณฑ์ เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ปรับค่าตัวแปรให้เหมาะสมและลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ เพื่อการประหยัดพลังงานของอุโมงค์อบสี

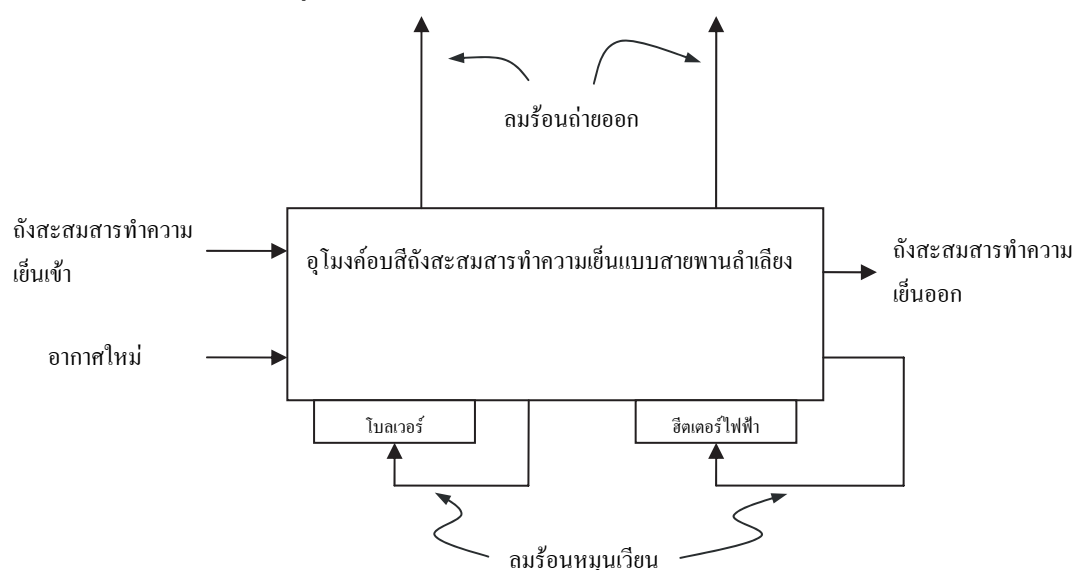
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1. เพื่อศึกษาอุณหภูมิ, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, คุณสมบัติและความหนาของฉนวนใยแก้ว และข้อมูลของระบบ Accumulator DIP line ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และในด้านการประหยัดพลังงาน และลดต้นทุนในกระบวนการผลิต

1.2.2. เพื่อจำลองแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบ และประเมินประสิทธิภาพของระบบ Accumulator DIP line ใหม่เปรียบเทียบกับระบบ Accumulator DIP line เดิม

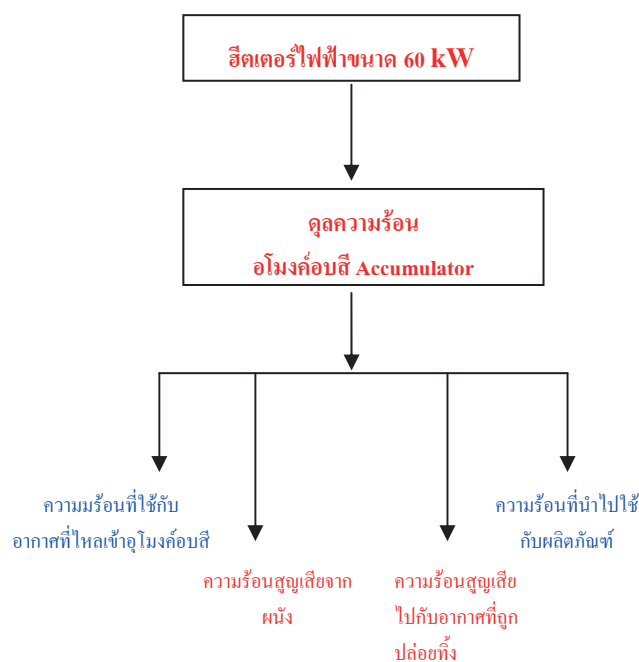
1.2.3. เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่มีผลกระทบต่อ คุณภาพของการชุบและอบสีถึงสะสมสารทำความเย็น

2. ไลอะแกรมของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็น



ภาพประกอบ 1 หลักการทำงานของอุโมงค์อบสี

การเคลือบและอบสีถึงสะสมสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบการทำความเย็น และการปรับอากาศ เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ โดยใช้ระบบ Accumulator DIP line นี้ มีหลักการทำงานดังภาพที่ 1 เริ่มตั้งแต่การนำถึงสะสมสารทำความเย็น(ชิ้นงาน) มาทำการเคลือบสี(ชุบสี) เสร็จแล้วแขวนชิ้นงานไว้ที่สายพานลำเลียง สายพานลำเลียงนี้เป็นแบบต่อเนื่องมีจุดแขวนทั้งหมด 198 จุด แต่ละจุดแขวนมี 3 ตะขอ ขนาดของชิ้นงานแบ่งเป็น 2 ขนาด คือ ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ขนาดเล็กมีน้ำหนัก 2.5-4 kg แขวน 3 ลูกต่อ 1 จุดแขวน ส่วนขนาดใหญ่มีน้ำหนัก 20 kg แขวน 1 ลูกต่อ 3 จุดแขวน สายพานลำเลียงนำชิ้นงานเข้าเตาอบสีด้วยความเร็ว 0.45 m/min ความร้อนที่ใช้ในการอบสีได้มาจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า ที่ตรงตำแหน่งกลางเตาอบสีมี hot air circulation fan ขนาด 100 cmm × 70 mmA × 2.2 kW สายพานลำเลียงชิ้นงานเข้าเตาอบสีอย่างต่อเนื่อง ที่จุดก่อนออกต้องผ่าน air curtain fan ขนาด 60 cmm × 30 mmA × 1.5 kW แล้วลำเลียงต่อไปยังกระบวนการผลิตอื่น สำหรับความร้อนที่ใช้เคลือบอบสีแล้วปล่อยออกสู่บรรยากาศ



ภาพประกอบ2 แสดงการดูดความร้อนของอิมมูมคอบสีจริง

จากภาพประกอบ 2 แสดงให้เห็นว่าพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะถูกแบ่งเป็นส่วนๆซึ่ง 2 ส่วนจะเป็นการสูญเสียกับอากาศที่ถูกปล่อยทิ้งและสูญเสียกับผนังของอิมมูมคอบสี

3. การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของอิมมูมคอบสี

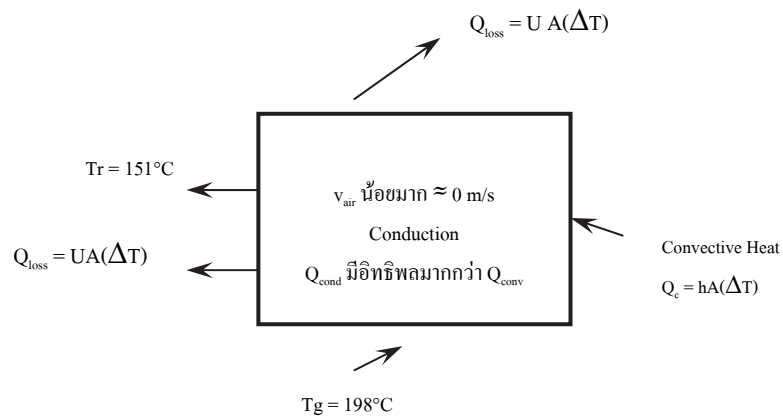
3.1 สมมุติฐานการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1. แบบจำลองเป็น 2 มิติ
2. การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ Steady State และ Conductive Heat Transfer
3. มวลอากาศภายในอิมมูมคอบสีมีความเร็วต่ำมาก
4. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัตถุและอากาศคงที่

5. Boundary Condition ทางช่องรีเทิร์นและพื้นของอุโมงค์อบสีเป็นอุณหภูมิคงที่
6. Boundary Condition ทางผนังด้านซ้ายและด้านบนมีการสูญเสียความร้อน (Q_{loss})
7. Boundary Condition ทางด้านขวาเป็น Convective Heat Transfer

3.2 ทฤษฎีของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของอุโมงค์อบสี

จากสมมุติฐานมวลอากาศร้อนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วช้ามาก ดังนั้น หลักการการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนจึงถูกนำมาใช้กับการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติ โดยในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุโมงค์อบสีจะให้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิคงที่ที่ 198°C ไหลเข้าและกระจายตัวไปตามพื้นของอุโมงค์อบสี และมีความร้อนสูญเสียผ่านผนังอุโมงค์อบสีทางด้านบนของอุโมงค์อบสีและพื้นที่ผนังด้านล่างที่ต่ำกว่าช่องรีเทิร์นลมร้อน ส่วนอุณหภูมิของลมร้อนในช่องรีเทิร์นจะถูกกำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 151°C และมีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนที่ตำแหน่งช่องทางเข้าอุโมงค์อบสี ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1



ภาพประกอบ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Conductive Heat Transfer และ Boundary Conditions

จากภาพประกอบ 3 จะได้สมการการถ่ายเทความร้อนโดยการนำของลมร้อนภายในอุโมงค์อบสีดังต่อไปนี้

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 T}{\Delta y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

นำหลักการของ Finite Difference มาประยุกต์เพื่อแก้สมการ (3.1) หากการกระจายตัวทางอุณหภูมิของลมร้อนภายในอุโมงค์อบสีซึ่งจะได้

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} = \frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

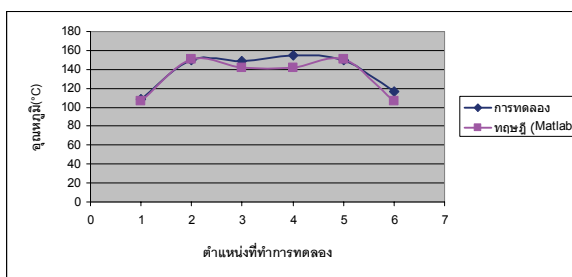
$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta y^2} = \frac{T_{m,n-1} - 2T_{m,n} + T_{m,n+1}}{\Delta y^2} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ดังนั้นจะได้สมการของโนด (Node) ภายในคือ

$$\frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2} + \frac{T_{m,n-1} - 2T_{m,n} + T_{m,n+1}}{\Delta y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

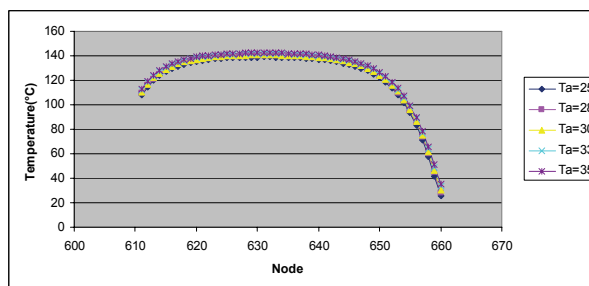
จำนวนโหนดที่ใช้ในมีทั้งหมด 990 โหนด (55×18) และ Boundary Conditions ของอุโมงค์ที่ประยุกต์ใช้กับหลักการ Finite Difference แสดงในภาพประกอบ 3

4. ผลการวิเคราะห์ตัวแปรทางความร้อน



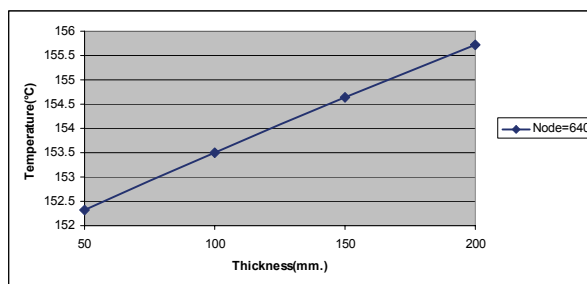
ภาพประกอบ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทำการทดลองกับค่าที่ได้จากทฤษฎี(MATLAB) ที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่ทำการทดลอง

ผลจากภาพประกอบ 4 พบว่าโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอปสี่ที่ได้จากการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอปสี่ที่ได้จากการตรวจวัดจริงซึ่งมีความผิดพลาดสูงสุด 8.57% ที่ตำแหน่งที่ 4 เนื่องจากที่ตำแหน่งการวัดที่ 4 เซ็นเซอร์ของ RTD ได้รับลมร้อนมากกว่าตำแหน่งการวัดอื่น เพราะแผ่นเหล็กลดความเร็วของลมร้อนที่ช่องจ่ายลมร้อนบริเวณตำแหน่งการวัดที่ 4 หายไป



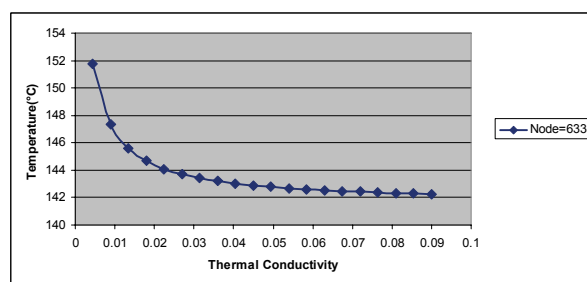
ภาพประกอบ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่า $T_a = 25-35^{\circ}\text{C}$ ที่เข้าเตาอบ พิจารณาที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์อบสี่ในแนวแกน x และค่า $k = 0.08325 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

ภาพประกอบ 5 แสดงเปรียบเทียบค่า T_a ในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 35°C ผลที่ได้ คือ ค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอปสี่ที่ $T_a = 25^{\circ}\text{C}$ จะมีค่าน้อยกว่าค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอปสี่ที่ $T_a = 35^{\circ}\text{C}$ อยู่ประมาณ 5°C ถึง 9°C ในช่วง 0.9 m แรกจากช่องทางเข้าอุโมงค์และจากช่วง 0.9 m ไปจนถึงช่วงท้ายอุโมงค์อุณหภูมิภายในอุโมงค์คอปสี่ที่ $T_a = 25^{\circ}\text{C}$ จะมีค่าน้อยกว่าค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอปสี่ที่ $T_a = 35^{\circ}\text{C}$ อยู่ประมาณ 3°C ถึง 4°C ซึ่งแสดงว่า T_a ที่ช่องทางเข้าอุโมงค์มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์ในช่วงต้นทางของอุโมงค์



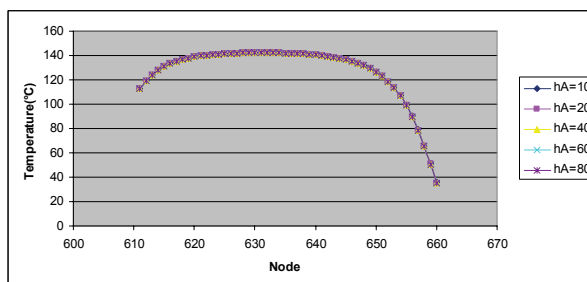
ภาพประกอบ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาของฉนวนใยแก้วพิจารณาที่ตำแหน่งโหนด 640 เป็นตำแหน่งเดียวกันกับที่ทำการวัดจริงที่ตำแหน่งที่ 1 โดยใช้ค่า $k = 0.045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

ภาพประกอบ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความหนาขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสูงขึ้นตามไปด้วย เห็นได้จากเส้นกราฟนั้นเป็นเส้นตรง เพราะว่าเมื่อเพิ่มความหนาของฉนวนใยแก้วขึ้นแล้ว จะทำให้อุโมงค์อบสามารถรักษาอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบได้ดีขึ้น แต่ถ้าเพิ่มความหนาของฉนวนใยแก้วขึ้นมากเกินไปจะเป็นการสิ้นเปลืองต้นทุนเกินไป ดังนั้นควรทำการเปรียบเทียบค่าความหนาของฉนวนใยแก้วที่เหมาะสมทั้งผลกระทบต่อทางความร้อนและราคาของฉนวนใยแก้ว



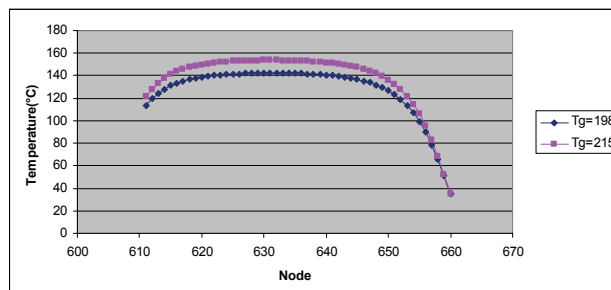
ภาพประกอบ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่า k กับค่า $T_a = 35^\circ\text{C}$ ที่เข้าอุโมงค์อบพิจารณาที่ตำแหน่งโหนด 633 เป็นตำแหน่งกลางอุโมงค์อบ

ผลจากภาพประกอบ 7 พบว่าฉนวนใยแก้วที่มีคุณภาพดีจะมีค่า k ที่ต่ำ เริ่มตั้งแต่ $0.0045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ถึง $0.090 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ โดยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน (k) ขึ้นครั้งละ 10% ค่าที่ได้พบว่าค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบจะลดลงเป็นส่วนกลับกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน (k) ที่จะเพิ่มสูงขึ้น โดยตั้งแต่ค่า $k = 0.072 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ไปแล้ว อุณหภูมิภายในอุโมงค์อบค่อนข้างจะคงที่



ภาพประกอบ 8 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่ช่องทางเข้าอุโมงค์อบ

จากภาพประกอบ 8 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่ช่องทางเข้าอุโมงค์อบสี พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วง $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ถึง $80 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ซึ่งเป็นช่วงที่อากาศของบรรยากาศภายนอกไหลเวียนโดยไม่มีผลกระทบกับโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสี



ภาพประกอบ 9 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของพื้นอุโมงค์ที่วัดได้

จริง ($T_{\text{actual}} = 198 \text{ }^{\circ}\text{C}$) กับอุณหภูมิของพื้นอุโมงค์ที่ค่า set point ($T_{\text{sp}} = 215 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

ผลจากภาพประกอบ 9 แสดงว่าอุณหภูมิที่พื้นอุโมงค์ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนของอุโมงค์อบสีมีอิทธิพลต่อโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีในช่วงกลางถึงท้ายของอุโมงค์อบสีอย่างมาก ผลต่างของอุณหภูมิจะเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะช่วง 2.4 m จากช่องทางเข้าอุโมงค์ถึงช่วง 3.4 m ของอุโมงค์มีผลต่างของอุณหภูมิ $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่ในช่วง 0.1 m แรกจากช่องทางเข้าอุโมงค์โปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีมีผลต่างของอุณหภูมิเพียง $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับกลางอุโมงค์อบสี

5. สรุป

ผลสรุปการวิจัยพบว่าสถานะของอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็นในปัจจุบันหรือสภาพก่อนการปรับปรุงอยู่ในสถานะที่เบี่ยงเบนไปจากสภาวะที่ตั้ง เช่น สภาพของแผ่นเหล็กที่ช่องจ่ายลมร้อน สีเคลือบที่หกดปิดช่องจ่ายลมร้อนเนื่องจากแผ่นเหล็กหาย, ฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีสีเคลือบเคลือบที่หลุดหรือขดลวดกำเนิดความร้อนการปล่อยอากาศร้อนทิ้งมากเกินไปซึ่งทั้งหมดนี้มีผลต่อการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าและคุณภาพของผลิตภัณฑ์และทั้งหมดนี้เนื่องมาจากการใช้งานโดยขาดการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องอีกทั้งฉนวนใยแก้วของอุโมงค์อบสีเสื่อมคุณภาพ 84.44 % จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์พบว่าความหนาและคุณภาพของฉนวนใยแก้วมีผลกระทบต่อการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในอุโมงค์อบสีโดยความหนาของฉนวนเป็นสัดส่วนโดยตรงกำลังหนึ่งกับอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีที่ตำแหน่งใดๆ และคุณภาพของฉนวนมีอิทธิพลต่อโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อย่างมาก โดยเฉพาะช่วงกลางและท้ายอุโมงค์อบสีและที่ตำแหน่งใดๆ คุณภาพของฉนวนเป็นสัดส่วนกำลังสองกับอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีอีกทั้งอุณหภูมิของอากาศที่ช่องทางเข้าอุโมงค์อบสีและอุณหภูมิที่พื้นอุโมงค์อบสีมีอิทธิพลต่อโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อย่างมาก โดยเฉพาะช่วงกลางและท้ายอุโมงค์อบสี อุณหภูมิแวดล้อมของอุโมงค์อบสีเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิของอุโมงค์อบสีแต่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการสร้างอุโมงค์อบสีโดยเฉพาะความหนาฉนวนและชนิดของฉนวน.

จากผลการวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพของอุโมงค์อบสีและผลิตภัณฑ์ทางผู้ประกอบการควรที่จะทำกิจกรรมดังต่อไปนี้

1. เปลี่ยนจนวนไขแก้วแบบแผ่นหนา 2 นิ้วใหม่
2. จัดตารางทำความสะอาดพื้นอุโมงค์อบสีทุกเดือน
3. ซ่อมแซมหรือเปลี่ยนแผ่นเหล็ก (Cover Plate) ลดความเร็วที่ช่องจ่ายอากาศร้อนที่พื้นอุโมงค์อบสีทั้งหมด
4. จัดตารางทำความสะอาดฮีตเตอร์เป็นประจำทุกเดือน

6. รายการอ้างอิง

โสธรญา แข็งการ และ กนต์ธร ชำนิประศาสน์, 2551 การใช้ **MATLAB** สำหรับงานทางวิศวกรรม พิมพ์ครั้งที่ 2.

กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Cengel, A Yunus, 2006. **Heat and Mass Transfer**. 3rd ed. USA: McGraw Hill.

Fausett, V Laurene, 1999. **Applied Numerical Analysis using MATLAB**. USA: Prentice Hall.

Incropera, P Frank. and David P Dewitt, 1990. **Introduction to Heat Transfer**. 2nd ed. USA: John Wiley and Sons.

Patankar, V Suhas, 1980. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. USA: Taylor and Francis.

การหาตำแหน่งและขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย
โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้การเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด
OPTIMAL PLACEMENT AND CAPACITY OF DISTRIBUTED GENERATOR
USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

วิชิต เครือสุข

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail : wichit.kr@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอ การหาตำแหน่งและขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้การเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาค เพื่อลดกำลังจริงสูญเสียในระบบจำหน่ายให้มีค่าต่ำสุด ซึ่งในเงื่อนไขเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายนี้มีจำนวนมากกว่าหนึ่งเครื่องและสี่แบบ ในครั้งในการคำนวณจะต้องพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเพื่อหาค่ากำลังจริงสูญเสีย การทดสอบได้มีการเปรียบเทียบระหว่าง วิธีการเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาคกับวิธีการฮิวริสติก และวิธีการคัดเลือกพันธุกรรม ซึ่งได้ทดสอบกับระบบไฟฟ้ามาตรฐาน 33 บัส และ 69 บัส ของ IEEE จากผลการทดสอบวิธีการเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาคที่นำเสนอพบว่า การหาตำแหน่งและขนาด ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่มีหลายเครื่อง ได้คำตอบที่ทำให้กำลังจริงสูญเสียในระบบไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าต่ำสุดตามแต่ละแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยมีค่าแรงดันตก ลดน้อยลง อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายป้อนแต่ละส่วน ยังมีค่าลดลงด้วย

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย วิธีการเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาค วิธีการคัดเลือกพันธุกรรม

ABSTRACT

This paper proposes a particle swarm optimization (PSO) algorithm for optimal placement of distributed generator (DG) in primary distribution systems for minimizing the total real power loss. The proposed PSO algorithm is used to determine optimal placement and capacity of multi-DGs. Four types of DG are considered and the distribution load flow is used to calculate the exact loss. Test results indicate that PSO method can obtain better results than the simple heuristic search method and genetic algorithms (GA) on the 33-bus and 69-bus radial distribution systems. The PSO can obtain maximum loss reduction for each of four

types of optimally placed multi-DGs. Moreover, voltage profile improvement and branch current reduction are obtained.

KEYWORDS: Distributed generation, DG types, Particle swarm optimization, Genetic algorithm

1. บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย หรือหน่วยผลิตไฟฟ้ารายย่อย (Distributed Generator, DG) ถูกจำกัดความเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับบริเวณของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งอาจจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ แต่เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดจึงควรเชื่อมโยง DG เข้ากับระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ DG สามารถส่งไฟฟ้าเข้าระบบได้เมื่อมีไฟฟ้าเหลือใช้ และสามารถดึงไฟฟ้าจากระบบมาใช้เมื่อความต้องการมากกว่าที่ผลิตได้ โดยปกติ DG จะมีขนาดเล็กแต่ก็ไม่มีข้อจำกัดชัดเจนว่าต้องมีขนาดไม่เกินเท่าใด อาจมีขนาดเป็นกิโลวัตต์ (kW) จนถึงหลายเมกะวัตต์ (MW) (Thomas Ackermann, 2001: 195-204) ทางเศรษฐศาสตร์ การติดตั้ง DG เข้ากับระบบไฟฟ้าเป็นปัญหาวิจัยที่น่าสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อ DG หลายแบบ ที่ถูกนำไปติดตั้งในท้องถิ่นต่างๆ ช่วยลดภาระการลงทุนขยายระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้มาก การกำหนดขนาดการผลิต และตำแหน่งที่สมควรติดตั้ง จึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะถูกนำมาพิจารณา (Caisheng Wang, 2004: 2068-2076) สำหรับงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาปัญหาการหาตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Optimal Placement of DG : OPDG) โดยวัตถุประสงค์เพื่อลดกำลังสูญเสียจริงในระบบ ซึ่งมีหลากหลายงานวิจัยให้ความสำคัญในประเด็นนี้มาก

บทความนี้จึงได้นำเสนอการหาคำตอบ OPDG โดยวิธีการหาคำตอบแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (Particle Swarm Optimization, PSO) เป็นการต่อยอดผลงานวิจัย (Wichit Krueasuk, 2006) เพื่อเกิดความสำเร็จของงานวิจัย จึงได้ทำการเปรียบเทียบกับ วิธีการกระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) และยังเปรียบเทียบกับวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลงานวิจัยวิธีการ PSO ให้คำตอบได้ดีที่สุดกว่าแบบอื่นๆ ที่กล่าวมา และยังใช้ระยะเวลาคำนวณที่สั้นกว่าอีกด้วย

2. วิธีการคำนวณเชิงปัญญาประดิษฐ์

2.1 กระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม

วิธีการคัดเลือกทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) (Emad Elbeltagi, 2005: 43-53) เป็นกระบวนการค้นหา (search) คำตอบแบบหนึ่ง ที่มีพื้นฐานการเลียนแบบกระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรมตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิต โดยที่พันธุ์ดีและเหมาะสมกว่า จะถูกคัดเลือกให้คงอยู่ หลักวิธี GA จึงมักถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาออปติไมเซชัน (optimization problem) เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไข (constraint) และฟังก์ชันของจุดประสงค์ (objective function) ที่กำหนด โดยเริ่มต้นจากการสุ่มค่าคำตอบขึ้นมา จำนวนหนึ่ง เรียกว่าเป็นประชากร (population) โดยที่แต่ละประชากร เรียกว่า โครโมโซม (chromosome) ในแต่ละโครโมโซม ประกอบด้วยยีน (gene) หลายๆ ยีนเรียงต่อกัน โดยมากจะแทนแต่ละยีนด้วยเลขไบนารี (binary) จากนั้นจึงพิจารณาประชากรทั้งหมดว่ามีความเหมาะสมเพียงใด โดยการนำไปแทนในฟังก์ชันจุดประสงค์ ซึ่งผลลัพธ์

แสดงถึงค่าความเหมาะสม (fitness value) ของประชากรนั้น เมื่อทราบค่าความเหมาะสมแล้วจึงทำการคัดเลือกพ่อแม่พันธุ์และแม่พันธุ์ (parent selection) โดยอาจจะใช้วิธีการที่เรียกว่า วงล้อรูเล็ตต์ (roulette-wheel method) ซึ่งจะเป็นการนำโครโมโซมรุ่นพ่อและรุ่นแม่ ถ่ายทอดไปยังรุ่นลูก (offspring) โดยตรง หรืออาจใช้วิธีการอื่นๆ ก็ได้ หลังจากที่ได้พ่อแม่พันธุ์และแม่พันธุ์แล้ว สุ่มเลือกพ่อแม่พันธุ์และแม่พันธุ์ มาผลิตรุ่นลูก เป็นประชากรรุ่นใหม่ ที่เกิดขึ้นมาด้วยวิธีการกลายพันธุ์หรือมิวเตชัน (mutation) หรือ การครอสโอเวอร์(crossover)

2.2 การเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด

วิธีการการเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด(Particle Swarm Optimization, PSO) เป็นการค้นหาคำตอบที่มีพื้นฐานเลียนแบบพฤติกรรมทางสังคมและพลศาสตร์การเคลื่อนไหวของฝูงแมลง นกหรือปลา ซึ่งถูกนำเสนอโดย Kennedy and Eberhart (Kennedy J,1995:1942-1948) เหมาะสำหรับปัญหาที่ตัวแปรมีค่าต่อเนื่อง ซึ่งประสบความสำเร็จในการนำไปใช้หาคำตอบของปัญหาที่หลากหลาย โดยมีข้อดีหลายประการ เช่น ใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริธึมน้อย สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก เป็นต้น ซึ่งคำตอบที่เหมาะสมที่สุด จะถูกค้นหอย่างเป็นขั้นเป็นตอน โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค (particle) ตามเวลา ภายในสเปซของการค้นหา (search space) ซึ่งการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคจะขึ้นกับประสบการณ์ของมันเอง ซึ่งเรียกค่านี้ว่า Pbest และตามประสบการณ์ของอนุภาคที่อยู่ข้างเคียง เรียกค่านี้ว่า Gbest

3. วิธีการหาคำตอบ

วิธีการหาคำตอบของปัญหา (Problem Formulation) การหาตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Optimal Placement of DG : OPDG) จะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การหาคำตอบที่มุ่งเน้นเพื่อลดกำลังสูญเสียไฟฟ้าจริง (Real Power losses) (I.O.Elgerd,1971) ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) ตามสมการที่ 3.1 โดยการพิจารณาข้อจำกัดของระบบที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ในการทำงาน โดยสามารถแสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$\text{หาค่าต่ำสุดของกำลังสูญเสียไฟฟ้าจริง} \quad P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j) + B_{ij} (Q_i P_j - P_i Q_j) \quad , \quad (3.1)$$

โดยที่เป็นไปตามข้อจำกัดของสมการสมดุลกำลังงานไฟฟ้า

$$\sum_{i=1}^N P_{DG_i} = \sum_{i=1}^N P_{D_i} + P_L \quad (3.2)$$

และข้อจำกัดพิกัดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในสาย

$$|V_i|^{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|^{\max} \quad , \quad (3.3)$$

$$|I_{ij}| \leq |I_{ij}|^{\max} \quad (3.4)$$

และข้อจำกัดขอบเขตการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไฟฟ้าแบบต่างๆ ได้แก่

แบบที่หนึ่ง เป็น DG ที่สามารถจ่ายได้เฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) เช่น การผลิตด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ

$$P_{DG_i} = P_{D_i} - \frac{1}{A_{ii}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (A_{ij} P_j - B_{ij} Q_j) \quad (3.5)$$

แบบที่สอง เป็น DG ที่สามารถจ่ายได้เฉพาะกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive power) เช่น ซิงโครนัส คอนเดนเซอร์ (Synchronous condenser) ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ

$$Q_{DGi} = Q_{Di} - \frac{1}{A_{ii}} \sum_{j=1, j \neq i}^N (A_{ij} Q_j + B_{ij} P_j) \quad (3.6)$$

แบบที่สาม เป็น DG ซึ่งสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง แต่ต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ เช่น เทอร์ไบน์ พลังงานลม (Wind turbine) (M.Ermis, 1992:71-83), (DTI, 2004) โดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$0.0032 A_{ii} P_{DGi}^3 + P_{DGi} [1.004 A_{ii} + 0.084 Q_{Di} - 0.08 Y_i] + (X_i - A_{ii} P_{Di}) = 0 \quad (3.7)$$

แบบที่สี่ เป็น DG ซึ่งสามารถรักษาระดับแรงดันที่บัส กรณีนี้ได้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งติดตั้ง ณ เจนเนอเรเตอร์บัส (Generator bus) ที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังในระบบไฟฟ้า (Load flow) มีกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนี้

$$P_i = P_{DGi} - P_{Di} = -\frac{1}{A_{ii}} \sum_{j=1, j \neq i}^n (A_{ij} P_j - B_{ij} Q_j) \quad (3.8)$$

โดยที่ $A_{ij} = \frac{R_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)}{V_i V_j}$ $B_{ij} = \frac{R_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)}{V_i V_j}$

P_i = Net real power injection in bus 'i'.	Q_i = Net reactive power injection in bus 'i'.
R_{ij} = The line resistance between bus 'i' and 'j'.	V_i = The voltage at bus 'i'.
δ_i = The angle at bus 'i'.	$Loss_k$ = Distribution loss at section k.
P_L = The real power loss in the system.	P_{DGi} = The real power generation DG at bus i.
P_{Di} = The power demand at bus i.	X_i = reactance at bus 'i'.
Y_i = admittance at bus 'i'.	

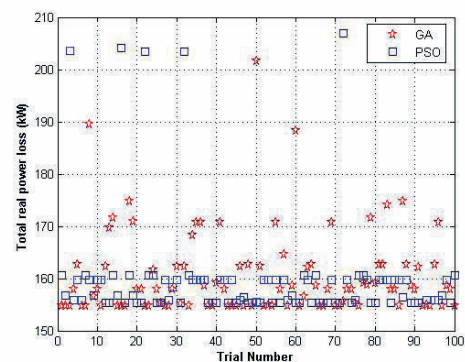
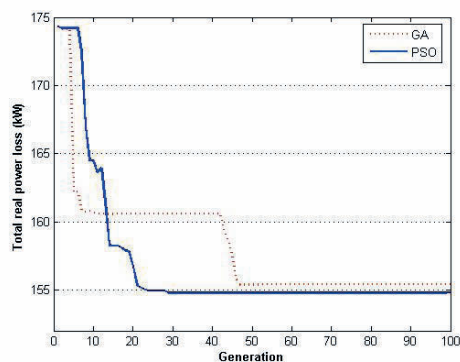
4. ผลการทดสอบ

ระบบไฟฟ้ากำลังที่จะนำมาใช้ทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ คือ ระบบจำหน่ายมาตรฐาน 33 บัส และ 69 บัสของ IEEE ทั้งนี้การทดสอบจัดขึ้นภายใต้สถานการณ์จำลองต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์อื่นๆ ระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 บัส (M.A. Kasem, 2000: 251-255) ของ IEEE เป็นระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยบัสจำนวน 33 ชุด และมีส่วนของสายป้อนจำนวน 32 ส่วน ระบบนี้มีโหลดไฟฟ้ารวมคิดเป็นกำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ เท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 Mvar ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในระบบคิดเป็น 221.4346 kW และ 150.1784 kVar ตามลำดับ ส่วนระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส (M.E. Baran 1989: 735-743) ของ IEEE เป็นระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยบัสจำนวน 69 ชุด และมีส่วนของสายป้อนจำนวน 68 ส่วน ระบบนี้มีโหลดไฟฟ้ารวมคิดเป็นกำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ เท่ากับ 3.80 MW และ 2.69 MVar ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในระบบคิดเป็น 230.0372 kW และ 104.3791 kVar ตามลำดับ ในการทดสอบหาคำตอบด้วย PSO ทั้งสองระบบ ใช้ตัวแปรดังนี้

Population size=200, Maximum generation (k_{max}) = 100 และ The maximum number of DG = 3

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (PSO) สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส ของ IEEE จำนวน 100 ครั้ง พบว่าใช้เวลาในการประมวลผลเฉลี่ย 7.1564 วินาที ในภาพประกอบ 1

เป็นการแสดงถึงกรณีที่ติดตั้ง DG แบบที่สอง พบว่าการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วย PSO กับ GA เปรียบเทียบกันจำนวน 100 ครั้ง จะเห็นว่าคำตอบที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี PSO มีแนวโน้มให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธี GA และเวลาที่ใช้ก็ยังน้อยกว่า ซึ่งระบบทดสอบของ IEEE แบบ 33 บัส และ 69 บัส สำหรับ DG ทั้ง 4 แบบแสดงในตารางที่ 1 ถึง ตารางที่ 4 พบว่า การคำนวณด้วยวิธี GA กรณีติดตั้ง DG จำนวน 1 เครื่อง ให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับวิธี Heuristic Search โดยที่ สำหรับระบบทดสอบ IEEE 33 บัส การติดตั้ง DG แบบที่ 1 จำนวน 1 เครื่อง สามารถลดกำลังสูญเสียจริงและกำลังสูญเสียแอกทิฟ ได้ถึง 47.52% และ 43.13% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการติดตั้ง DG แบบที่ 2 หรือแบบที่ 3 หรือแบบที่ 4 อย่างใดอย่างหนึ่ง จำนวน 1 เครื่อง ที่สามารถลดกำลังสูญเสียจริง และกำลังสูญเสียแอกทิฟ ได้เป็น 28.38% และ 27.56% หรือ 26.06% และ 23.11% หรือ 65.69% และ 62.14% ตามลำดับ



ภาพประกอบ 1 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการ GA และ PSO ในการลู่เข้าหาคำตอบและการให้คำตอบแต่ละครั้งในระบบ 69 บัส

ตารางที่ 1 Optimal DG Placement for DG Type 1

System	Method	Bus No.	DG Size (MW)	Bus No.	DG Size (MW)	Bus No.	DG Size (MW)	Ploss (kW)	Qloss (kvar)	Loss Reduction %	
										Real	Reactive
33 bus	Load flow analysis							221.4346	150.1784		
	Heuristic search	12	2.4939					116.2678	85.4214	47.49	43.12
	GA	12	2.5118					116.2186	85.4101	47.52	43.13
		27	0.8353	22	1.0588			91.5217	62.4928	58.67	58.39
		27	0.9471	13	0.5373	28	0.7608	83.9684	58.3246	62.08	61.16
	PSO	12	2.4939					116.2678	85.4214	47.49	43.12
		22	1.1079	27	0.8348			91.2417	62.4336	58.80	58.43
		10	1.0774	29	0.7597	22	1.0205	76.1691	52.9743	65.60	64.73
	Load flow analysis							230.0372	104.3791		
	Heuristic search	56	1.8071					84.9390	41.4520	63.08	60.29
69 bus	GA	56	1.8039					84.9972	41.4767	63.05	60.26
		57	0.6118	56	1.6922			73.8617	36.8800	67.89	64.67
		5	1.0961	63	0.6490	56	1.7294	74.7338	37.0388	67.51	64.52
		56	1.8074					84.9801	41.4643	63.06	60.28
	PSO	56	1.7241	53	0.5194			73.1886	36.7292	68.18	64.81
		56	1.6667	55	0.3759	33	0.5084	70.8786	35.6864	69.19	65.81
	Load flow analysis										

ตารางที่ 2 Optimal DG Placement for DG Type 2

System	Method	Bus No.	DG Size (Mvar)	Bus No.	DG Size (Mvar)	Bus No.	DG Size (Mvar)	Ploss (kW)	Qloss (kvar)	Loss Reduction %	
										Real	Reactive
33 bus	Load flow analysis							221.4346	150.1784		
	Heuristic search	22	1.2092					158.6780	108.7820	28.34	27.56
	GA	22	1.2451					158.5913	108.7943	28.38	27.56
		19	0.5373	22	1.0961			149.0894	101.4992	32.67	32.41
		10	0.7235	24	0.6490	16	0.7235	152.8712	105.6746	30.96	29.63
	PSO	22	1.1870					158.7799	108.8075	28.29	27.55
		25	0.4367	22	1.0146			148.6830	101.0767	32.85	32.70
		27	0.3692	22	1.0008	10	0.4907	144.9050	98.7541	34.56	34.24
69 bus	Load flow analysis							230.0372	104.3791		
	Heuristic search	56	1.2864					155.4120	72.0650	32.44	30.96
	GA	56	1.2824					155.3853	72.0560	32.45	30.97
		25	0.7235	54	0.9098			161.2377	74.5979	29.91	28.53
		8	0.5000	24	0.7980	58	1.3196	153.8239	71.1782	33.13	31.81
	PSO	56	1.3266					155.2927	71.9696	32.49	31.05
		53	0.3679	56	1.2478			149.6289	69.6846	34.95	33.24
		56	1.2025	61	0.2332	33	0.3707	148.3148	69.1167	35.53	33.78

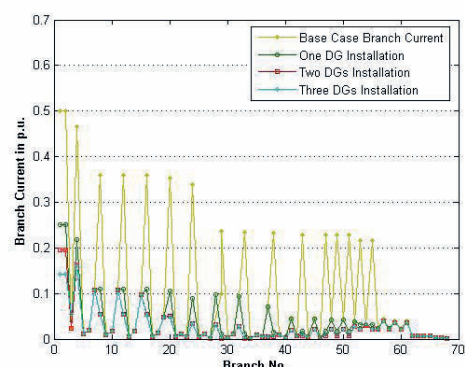
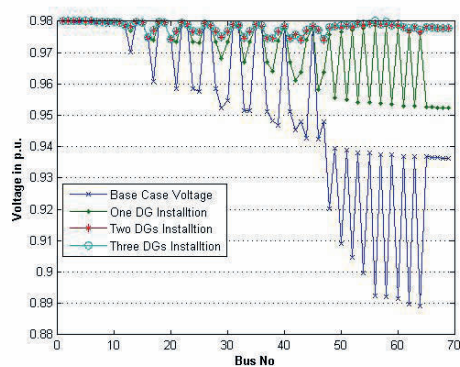
ตารางที่ 3 Optimal DG Placement for DG Type 3

System	Method	Bus No.	DG Size (MVA)	Bus No.	DG Size (MVA)	Bus No.	DG Size (MVA)	Ploss (kW)	Qloss (kvar)	Loss Reduction %	
										Real	Reactive
33 bus	Load flow analysis							221.4346	150.1784		
	Heuristic search	12	2.5587					163.8417	115.5620	26.01	23.05
	GA	12	2.5465					163.7296	115.4774	26.06	23.11
		2	1.3306	15	2.3581			165.5323	120.9607	25.25	19.46
		3	0.7997	7	1.1564	14	1.8371	172.6398	119.5674	22.04	20.38
	PSO	12	2.5592					163.8465	115.5656	26.01	23.05
		2	1.4383	12	2.5030			164.2177	115.5997	25.84	23.03
		3	0.6246	12	2.5024	2	1.0946	166.8321	117.0974	24.66	22.03
69 bus	Load flow analysis							230.0372	104.3791		
	Heuristic search	56	1.8836					161.6515	73.9285	29.73	29.17
	GA	56	1.8739					161.5671	73.9073	29.76	29.19
		6	1.4732	56	1.9108			161.9951	74.1490	29.58	28.96
		4	1.0211	20	1.6176	58	1.3661	173.6910	86.2349	24.49	17.38
	PSO	56	1.8888					161.7076	73.9445	29.70	29.16
		56	1.8885	3	2.1266			161.6967	73.9429	29.71	29.16
		56	1.8862	3	2.0101	2	0.5143	161.6938	73.9705	29.71	29.13

ตารางที่ 4 Optimal DG Placement for DG Type 4

System	Method	Bus	DG Size	Bus	DG Size	Bus	DG Size	Ploss	Qloss	Loss Reduction %	
		No.	(MW)	No.	(MW)	No.	(MW)	(kW)	(kvar)	Real	Reactive
33 bus	Load flow analysis							221.4346	150.1784		
	Heuristic search	12	2.4939					71.3837	57.4205	67.76	61.77
	GA	22	1.3569					75.9852	56.8591	65.69	62.14
		27	1.0565	22	1.0565			33.4937	24.1082	84.87	83.95
		19	1.1531	10	0.5675	22	0.7665	20.7152	15.3019	90.65	89.81
	PSO	12	2.4939					70.9487	57.2086	67.96	61.91
		22	1.1136	27	0.8285			29.8197	21.2726	86.53	85.84
		28	0.1481	22	1.0387	29	0.7598	29.7697	21.3455	86.56	85.79
69 bus	Load flow analysis							230.8372	104.3791		
	Heuristic search	56	1.8071					23.9885	14.9305	89.57	85.70
	GA	56	1.5804					28.5221	16.7665	87.60	83.94
		42	0.7419	60	1.371			16.9934	12.2539	92.61	88.26
		61	0.5504	50	0.5561	58	1.1418	24.0744	15.2767	89.53	85.36
	PSO	56	1.8074					23.5938	14.6854	89.74	85.93
		56	1.7252	53	0.517			7.3416	8.2134	96.81	92.13
		56	1.7448	4	0.23	55	0.5102	7.3433	8.1907	96.81	92.15

ภายหลังจากการติดตั้ง DG ในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้คุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ตำแหน่งบัสต่างๆ ดีขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ถ้าปราศจาก DG แรงดันไฟฟ้าที่บัส 64 จะตกมากที่สุด เหลือ 0.8891 p.u. และเมื่อติดตั้ง DG แบบที่ 4 จำนวน 3 เครื่อง จะทำให้แรงดันตกลดลง โดยมีค่าแรงดันที่บัส เป็น 0.9772 p.u.



ภาพประกอบ 2 แรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งบัส ก่อนและหลังการติดตั้ง DG

ในทำนองเดียวกัน พบว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายป้อนแต่ละส่วน ก็มีค่าลดลงด้วย ทำให้โอกาสที่ตัวนำของสายป้อนแต่ละส่วน จะมีโหลดไฟฟ้าเกินตัว ลดลง ซึ่งจะเห็นว่า กระแสไฟฟ้าในสายป้อนที่ 1 จากเดิมมีค่า 0.5008 p.u. ลดลงเหลือ 0.2516 p.u. หรือ 0.1963 p.u. หรือ 0.1427 p.u. เมื่อติดตั้ง DG จำนวน 1 เครื่อง หรือ 2 เครื่อง หรือ 3 เครื่อง ตามลำดับ

5. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของ OPDG ด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (PSO) สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ซึ่งได้มีการทดสอบคำนวณเปรียบเทียบกับวิธีกระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม (GA) โดยใช้ระบบไฟฟ้ามาตรฐาน 33 บัส และ 69 บัส ของ IEEE จากผลการทดสอบพบว่า กระบวนการคำตอบด้วยวิธี PSO ให้ผลการคำนวณที่ดีกว่าวิธี GA ไม่ว่าจะทดสอบกับระบบไฟฟ้ามาตรฐาน 33 บัส หรือ 69 บัส ของ IEEE ก็ตาม โดยสามารถค้นหาตำแหน่งบัส และขนาดของ DG ที่เหมาะสมที่สุด ที่จะใช้ติดตั้ง แล้วทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียจริง และกำลังไฟฟ้าสูญเสียรีแอกทีฟ มีค่าต่ำที่สุดภายในเวลาอันสั้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยมีค่าแรงดันตก ลดน้อยลง อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายป้อนแต่ละส่วน ยังมีค่าลดลงด้วย ทำให้สายป้อนแต่ละส่วน มีขีดความสามารถรับกระแสไฟฟ้าของโหลดได้เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม อนาคตควรจะได้มีการพิจารณา การเลือกใช้ DG ต่างชนิดกัน ติดตั้งในระบบร่วมกัน ในคราวเดียวกัน และทดสอบกับระบบจำหน่ายแบบอื่นๆ ด้วย

6. รายการอ้างอิง

- Caisheng Wang and M. Hashem Nehrir, 2004. "Analytical Approaches for Optimal Placement of distributed Generation Sources in Power Systems." **IEEE Transactions on Power Systems**. 19, 4 : 2068-2076.
- DTI, 2004. "Network Performance Benefits of Energy Storage for a Large indFarm. Retrieved 2006. from" <http://www.dti.gov.uk/renewables/publications/pdfs/ke1002460000.pdf/>
- Emad Elbeltagi, Tarek Hegazy and Donald Grierson, 2005. "Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms." **Advanced Engineering Informatics**. 19: 43-53.
- I.O. Elgerd, 1971. **Electric Energy System Theory: an Introduction**: McGraw Hill .
- Kennedy J and Eberhart R, 1995. "Particle Swarm Optimizer." **IEEE International Conference on Neural Networks (Perth, Australia), IEEE Service Center Piscataway, NJ, IV**. 1942-1948.
- M.A. Kashem, V. Ganapathy, G.B. Jasmon and M.I. Buhari, 2000. "A Novel Method for Loss Minimization in Distribution Networks." **Proceedings of International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies**. 251-255.
- M.E. Baran and F.F. Wu, 1989. "Optimal Sizing of Capacitor Placed on Radial Distribution Systems." **IEEE Trans, Vol. PWRD**. 2: 735-743.
- M. Ermis, H. B. Eratn, M. Demirekler, B. M. Saribatir, Y. Uctung, M. E. Sezer et al, 1992. "Various Induction Generator Scheme for Wind Power Electricity Generation." **Electric Power Systems Research**. 23: 71-83.
- Thomas Ackermann, Göran Andersson and Lennart Söder, 2001. "Distributed generation: a definition." **Electric Power Systems Research**. 57: 195-204.
- Wichit Krueasuk and Weerakron Ongsakul, 2006. "Optimal Placement of Distributed Generation Using Particle Swarm Optimization." **Proc.AUPEC 2006** .

**ผลการตอบสนองทางแสงด้วยการควบคุมแรงดันกับโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบ
โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบแคบ**

**VOLTAGE DEPENDENCE OF PHOTORESPONSE ON PLANAR METAL-
SEMICONDUCTOR-METAL PHOTODIODES WITH SHORT ELECTRODE**

สัญญา คุณขาว¹

ศรีัญญา นวลลอย¹

เอกลักษณ์ ถาวร¹

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

² ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: sanya.kh@spu.ac.th, ksurasa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

โฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบ (Metal-Semiconductor-Metal: MSM) ที่ภายใต้แสงตกกระทบ ณ บริเวณหลอดพาหะกระแสแสงเพิ่มขึ้นด้วยแรงดันไบอัสที่ให้ ด้วยผลการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองไม่เห็น พบว่ากระแสแสงที่ภายใต้แรงดันไบอัสก่อนการพังทลายจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น พบว่ากระแสแสงมีการเปลี่ยนแปลงตามความกว้างของบริเวณหลอดพาหะเนื่องจากแรงดันไบอัส โดยที่บริเวณหลอดพาหะได้มีการแผ่ขยายออกไปจนเต็มถึงขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่ง พบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้น จะทำให้คู่ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดขึ้นอย่างมาก ด้วยผลของกระบวนการดริฟท์ (Drift process) จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณหลอดพาหะนี้ ที่บริเวณรอยต่อชนิดกึ่งเป็นบริเวณหลอดพาหะที่ปรากฏกระแสแสง และสามารถตรวจจับสัญญาณกระแสตรง และกระแสสลับการที่บริเวณหลอดพาหะนี้ได้ขยายเพิ่มขึ้นตามการให้แรงดันไบอัส ด้วยการออกแบบโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2-10 μm เพื่อทำการทดสอบการตรวจจับสัญญาณกระแสตรง และกระแสสลับที่ความถี่ต่ำในช่วง 1kHz ถึง 1MHz สามารถยืนยันได้ว่าแรงดันไบอัสนั้นสามารถควบคุมการเพิ่มขึ้นของกระแสแสง

คำสำคัญ: โครงสร้างเชิงราบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ, กำแพงศักย์ชนิดกึ่ง, บริเวณหลอดพาหะ

ABSTRACT

Voltage dependence of the photocurrent on lateral spreading along the surface of space-charge-region (SCR) of planar metal-semiconductor-metal (MSM) structures has been investigated experimentally. The current-voltage (I-V) characteristics measurements under illumination in visible range showed a rapid increase photocurrent before breakdown voltage. This purpose for the SCR of such a structure plays a key role in generating photocurrent and thus, in dc and/or ac scheme, the wider SCR along the active surface is the better from the efficiency point of view. When light intensity on the MSM photodiode, the light that incidents the semiconductor surface is absorbed creating electron-hole pairs within the active region. We examined their SCR spreading through the photocurrent-bias voltage characteristics under the condition that the region between the metal electrodes on both sides is full depleted. Making use of a planar Mo/n-Si/Mo MSM structure with short electrode separation on silicon 10 Ω -cm and the junction internal separation is 2-10 μ m. We measured their dc and low frequency (1 kHz to 1MHz) photoresponse properties. It was confirmed that these structure showed an appreciable voltage controllability of the photocurrent.

KEYWORDS: Planar metal-semiconductor-metal structure; Schottky barrier; Space-charge-region

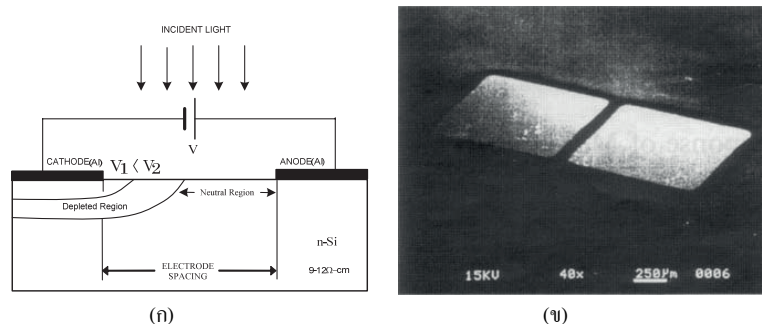
1. คำนำ

ในปัจจุบันการตรวจจับสัญญาณทางแสงที่มีประสิทธิภาพเพื่อเป็นตัวตรวจวัดสัญญาณที่มีความเร็วสูงและมีสัญญาณบกวนต่ำดั่งนั้นจึงได้มีการพัฒนาตัวรับรู้ทางแสงที่เป็นโครงสร้างเชิงราบ เนื่องจากการที่โฟโตไดโอด MSM นี้มีความไวในการตรวจจับที่สูง ความจุไฟฟ้า และกระแสมีค่าโครงสร้างของช็อตตี้โฟโตไดโอด MSM นี้ได้ถูกสร้างขึ้นแบบหลังชนกันที่เป็นแบบเชิงราบ ที่มีพื้นที่รับแสงอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าโดยมีสมบัติกระแสกับ แรงดันเป็นเรกติไฟล์ ที่เหมือนกับไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น แต่ในกรณีของช็อตตี้โฟโตไดโอด MSM เป็นรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ในงานวิจัยครั้งนี้เพื่อนำเสนอผลของกระแสแสงจากภายในตัวรับรู้ทางแสง ที่มีรอยต่อแบบช็อตตี้ในบริเวณรอยต่อของเขตปลอดพาหะ เนื่องจากแรงดันย้อนกลับ โดยการใช้อัตราตรวจจับทางแสงที่เป็นโครงสร้างอย่างง่ายเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคบมากที่อยู่ในระดับ 2-10 ไมโครเมตร โดยมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่บริเวณปลอดพาหะจะเป็นบริเวณที่ก่อให้เกิดกระแสแสง สามารถตรวจจับสัญญาณกระแสตรงและกระแสสลับที่มีความถี่ในช่วง 1kHz ถึง 1MHz

2. การทดลอง

กระบวนการสร้างโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo เตรียมจากแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type) ที่มีสภาพความต้านทาน 10 Ω -cm ทำความสะอาดแผ่นกำจัดไขมันและซิลิคอนไดออกไซด์ จากนั้นเคลือบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมด้วยเครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporator) โดยให้มี

ความหนาของฟิล์มประมาณ $3000 \text{ \AA}$ ที่ระดับความดัน $3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ จากนั้นนำมาสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี หลังจากได้ลวดลายของขั้วไฟฟ้าแล้วนำมากัดโลหะโมลิบดีนัมในส่วนที่ไม่ต้องการออกไปดังภาพประกอบ 1 เป็นภาพตัดขวางอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งจะพบว่าโลหะโมลิบดีนัมอยู่ในรูปของรอยต่อแบบช็อตติ โดยที่ขั้วไฟฟ้านี้จะมีขนาดพื้นที่ $2 \times 2 \text{ mm}^2$ เป็นแบบสองขั้วไฟฟ้า โดยค่าแรงศักย์ที่ได้ระหว่าง Mo และ Si มีค่าประมาณ $0.58\text{--}0.68 \text{ eV}$ โดยส่วนของซิลิคอนที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัดแสง (Active area) อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งมีระยะห่าง(d) เท่ากับ 2,3,5 และ $10 \text{ }\mu\text{m}$ ที่แคบมาก โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำจำนวนสองรอยสัมผัส ต่อกันแบบหันหลังชนกัน (Back To Back) ดังภาพประกอบ 1 ทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (SM.Sze,1981)



ภาพประกอบ 1 (ก) ภาพตัดขวางของโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM)
(ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงขั้วไฟฟ้าของชิ้นงานที่แยกจากกัน (ก่อนการต่อลวดตัวนำ)

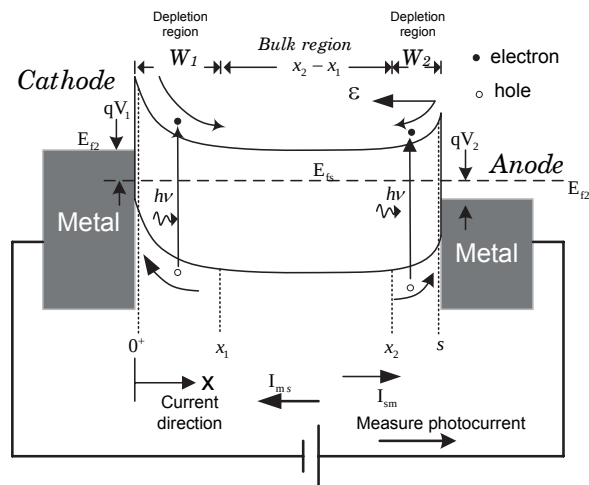
กระแสแสงที่ปรากฏที่ภายใต้แรงดันไบอัส และความเข้มของแสงที่ตกกระทบบังพื้นที่รับแสง จะเพิ่มขึ้นจนถึงสภาวะที่กระแสอิ่มตัวก่อนที่จะถึงช่วงแรงดันพังทลายซึ่งขั้วไฟฟ้าจะได้รับการไบอัสย้อนกลับ $[V_1]$ ทางด้านคาโทด และขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งจะได้รับการไบอัสตรงจะเป็นขั้วแอโนด $[V_2]$ โดยบริเวณปลอดพาหะจะขึ้นกับแรงดันที่จ่ายให้โดยที่ V_{bi1} และ V_{bi2} เป็นค่ากำแพงศักย์ที่รอยสัมผัสด้านคาโทดและแอโนด ดังสมการ

$$W_1(V) = \sqrt{\beta[V_{bi1} + V_1]} \quad : \text{Cathode} \quad (1)$$

$$W_2(V) = \sqrt{\beta[V_{bi1} - V_2]} \quad : \text{Anode} \quad (2)$$

โดยที่ $\beta = 2\epsilon_s/qN_D$

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบอัสดังภาพประกอบ 2 จะพบว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสแบบช็อตติ์เบริเออร์ทางด้านคาโทด $W_1(V)$ มีขนาดกว้างขึ้นในขณะที่เดียวกันที่บริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด $W_2(V)$ มีขนาดลดลง ซึ่งรอยสัมผัสด้านไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่ากำแพงศักย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ $V_{bi} + V_1$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจะไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ มีเพียงอิเล็กตรอนทางด้านโลหะที่เคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ $[I_{sm}]$ ส่วนทางด้านที่ได้รับการไบอัสตรงจะมีค่ากำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_1$ ดังนั้นอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำจึงเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปด้านโลหะได้ (A.K. Srivastava and others,1993:431-436)

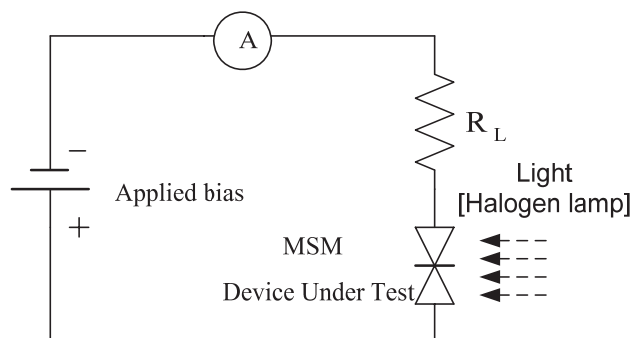


ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ $[I_{ms}]$ กระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสทางด้านคาโทดเป็นกระแสรั่วหรือกระแสมืด (Dark current) เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าไปยังด้านแอนโนด ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไหลในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าไปยังด้านคาโทดดังในภาพประกอบ 2 ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกไปภายนอกโดยมีกระแสแสง $[I_p]$ แสดงได้ดังสมการ

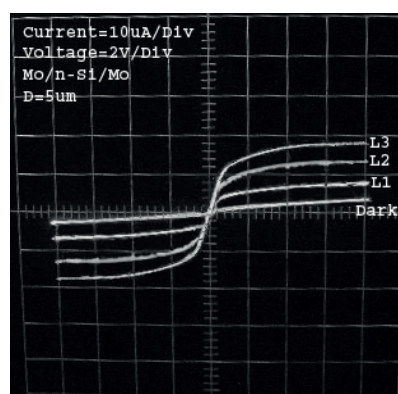
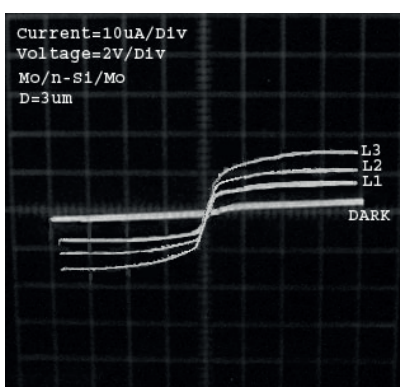
$$I_p = I_{Light} - I_{dark} \quad (3)$$

โดยที่ I_{Light} คือกระแสที่แสงตกกระทบพื้นที่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และ I_{dark} คือกระแสรั่ว หรือกระแสมืด

การวัดผลการตอบสนองทางแสงทางด้านกระแสตรง ของตัวตรวจจับทางแสงแบบโครงสร้างเชิงราบ MSM ด้วยวงจรในภาพประกอบ 3 โดยใช้ตัวอย่างชิ้นงานสิ่งประดิษฐ์โครงสร้างเชิงราบ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเคมมาระหว่าง 2-10 μm ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนกระแสตรง โดยที่กระแสมีค่านั้นมีค่าต่ำกว่าระดับไมโครแอมป์ที่แรงดัน 10 โวลท์ และที่ภายใต้เงื่อนไขของแสงที่ตกกระทบพบว่ากระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเข้าสู่สภาวะกระแสอิ่มตัว Saturation current ที่ทุกระดับความเข้มแสงดังแสดงในภาพประกอบ 4 อันเนื่องจากการที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นเคมมาก (Masui T. and Others,2003:1811)



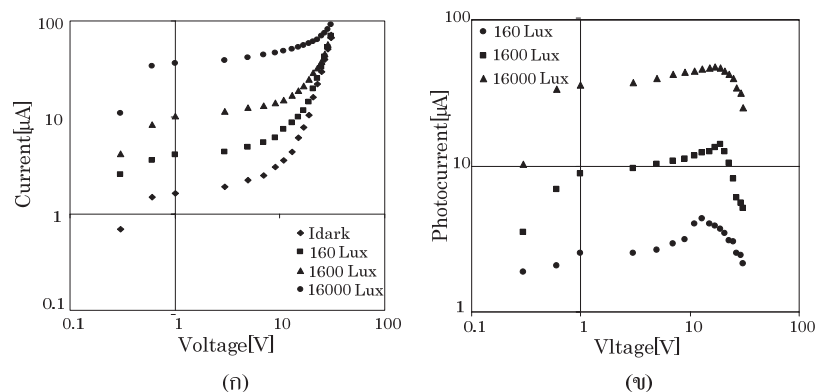
ภาพประกอบ 3 วงจรที่ใช้ในการทดลองวัดคุณสมบัติของกระแสกับแรงดัน



ภาพประกอบ 4 ลักษณะกระแส กับแรงดันจากการทดสอบด้วย Curve-Tracer กับ MSM-PDs ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า $3\mu\text{m}$ และ $5\mu\text{m}$ ที่ความเข้มแสง L_1 , L_2 และ L_3

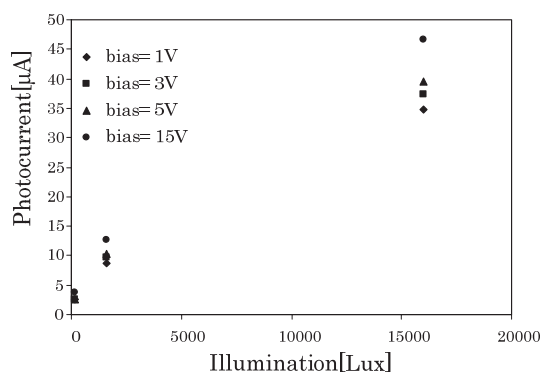
3.1 ลักษณะสมบัติด้านกระแสแสงกับแรงดัน

เมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายจนถึงบริเวณขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด Full depletion width อันเนื่องจากการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้น ณ บริเวณปลอดพาหะนี้ ตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัส เพื่อเปรียบเทียบผลของบริเวณปลอดพาหะที่แผ่ขยายจากขั้วคาโทดจนถึงขั้วแอโนด พิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน พบว่ากระแสมีการเพิ่มขึ้นอย่างราบเรียบตามลักษณะกระแสอิ่มตัว ก่อนที่จะถึงช่วงแรงดันพังทลายซึ่งกระแสจะมีการเพิ่มขึ้นตามผลการทวิคูณอย่างอวาแลนซ์ Avalanche multiplication ดังในภาพประกอบ 5

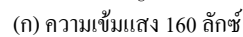


ภาพประกอบ 5 (ก) ความสัมพันธ์ของ Current-Voltage และ (ข) Photocurrent-Voltage ของ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 2 μm ที่ความเข้มแสง ต่างๆ

โดยที่ความเข้มแสงต่ำๆ และที่แรงดันไบอัสก่อนการพังทลายนั้นกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น และในขณะที่ความเข้มแสงสูงมาก จะทำให้กระแสแสงเพิ่มสูงมากในลักษณะที่ขึ้นกับแรงดันไบอัสนั้นเนื่องจากส่วนรับแสง ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เป็นส่วนของเนื้อซิลิคอนซึ่งเป็นบริเวณปลอดพาหะได้ดูดกลืนแสงอย่างมากก่อให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลสูงมากจากกระบวนการครีฟท์ (Drift processed) จะทำให้อิเล็กตรอน และโฮลวิ่งในทิศทางตรงกันข้ามได้อย่างรวดเร็ว (H. Takano and Others, 2000:216) เมื่อพิจารณาผลของความเข้มแสงที่มีต่อโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบที่มีขั้วไฟฟ้าแคบมาก จะพบว่ากระแสแสงนี้ยังคงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง แต่ที่แรงดันในช่วง 1-5 โวลต์ ก่อนการพังทลายจะพบว่ากระแสแสงจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ที่แรงดันเข้าสู่การแรงดันพังทลายที่แรงดันไบอัส 15 โวลต์ จะพบว่ากระแสแสงมีค่าสูงมากดังในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงที่แรงดันไบอัส 1, 3, 5 และ 15 โวลต์



(ข) ความเข้มแสง 1600 ลักซ์

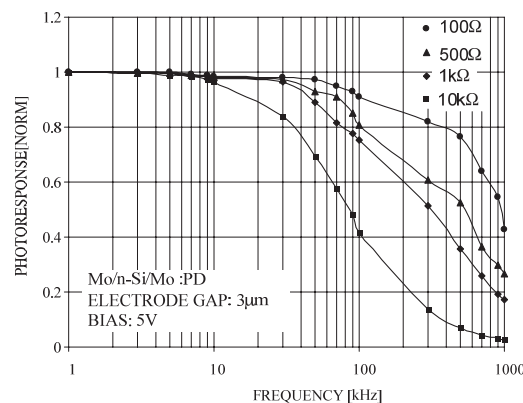
3.2 ลักษณะการตอบสนองด้านกระแสลับที่ความถี่ต่ำ

```
graph LR; SG[Signal generator] --> LD[Laser diode  
λ: 633 nm]; DBS[DC bias source] --> LD; LD -.-> ST[Sample under test]; ST --> O[Oscilloscope]
```

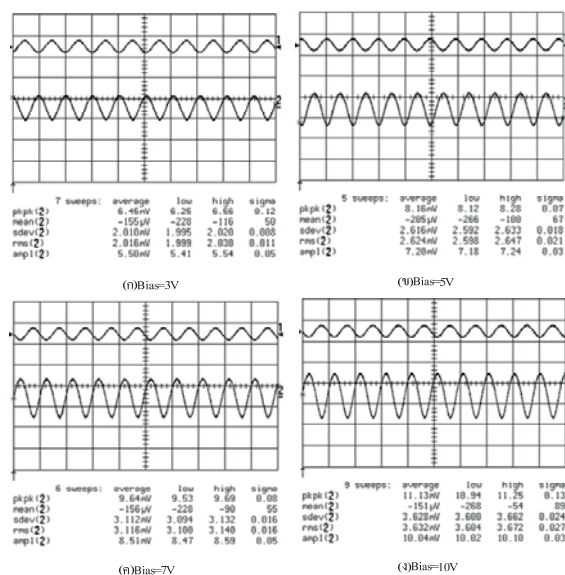
เนื่องจากสัญญาณแสง กับความถี่ตั้งแต่ 100 Hz-1 MHz ในภาพประกอบ 9 นี้เส้นกราฟของโหนดความต้านทานที่มีค่าน้อยความถี่เทิร์นโอเวอร์ (turn-over frequency)¹ จะมี 2 ค่า คือ ในกรณีที่โหนดความต้านทานเป็น 100 Ω

51

ความถี่เทิร์นโอเวอร์อยู่ที่ประมาณ 100 และ 300 kHz โดยความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีค่าน้อยจะถูกเรียกว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าต่ำ (Lower Turn-over Frequency : LTF) ในที่มีค่าประมาณ 100 kHz ในส่วนความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีค่ามากจะเรียกว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าสูง (Higher Turn-over Frequency : HTF) และมีค่าประมาณ 300 kHz ส่วนกราฟของโหลดความต้านทาน 10 k Ω จะพบความถี่ LTF อยู่ที่ประมาณ 10 kHz และความถี่ HTF มีค่าประมาณ 300 kHz (H. Takano and Others,2000:216) (S. Khunkhao and Others, 2007)



ภาพประกอบ 9 การตอบสนองสัญญาณแสงที่มีขนาดระยะห่างขั้วไฟฟ้า 3 μ m และโหลดความต้านทาน (R_L) 100 Ω , 500 Ω , 1 k Ω และ 10 k Ω



ภาพประกอบ 10 การตอบสนองสัญญาณด้วยสัญญาณรูปคลื่นที่มีความถี่ 10 kHz โดยมีภาระความต้านทาน (R_L) 1 k Ω ในโดเมนเวลาที่แรงดันไบแอส (ก) 3 V , (ข) 5 V , (ค) 7V และ (ง) 10V [input CH1:200mV,output CH2:5mV]

ผลการตอบสนองสัญญาณด้วยขอสซิลโลสโคปของการสัณฐานสัญญาณรูปคลื่นที่มีความถี่ 10 kHz โดยมีภาระความต้านทาน (R_L) 1 k Ω ที่ค่าแรงดันไบแอส $V = 3, 5, 7, 10V$ มีแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมความต้านทาน $V_o = 6.45, 8.12, 9.64, 10.94$ mV แสดงว่าขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้น เป็นผลของกระบวนการครีฟท์

drift process ที่บริเวณปลอดพาหะในช่วงแรงดันไบแอสก่อนการพังทลายซึ่งในช่วงของแรงดันไบแอสดังกล่าวเป็นช่วงที่มีกระแสแสงอิ่มตัว ดังนั้นกระแสเอ๊าท์พุทที่เป็นกระแสแสงจะไม่เพิ่มขึ้นมาก แสดงให้ทราบได้ว่าบริเวณปลอดพาหะได้ขยายออกไปจนถึงขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่ง โดยในการตอบสนองที่ความถี่ต่ำนั้นจะเหมือนการตอบสนองทางกระแสตรงที่เป็นการตอบสนองกระแสจากการแพร่ diffusion current

4. สรุป

จากผลการทดลองกับโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบ MSM เมื่อให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นจะทำให้บริเวณปลอดพาหะได้ขยายออกไปในแนวราบที่บริเวณผิวหน้าของพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วคาโทด และแอโนด โดยบริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายออกไปจนเต็มพื้นที่รับแสง(Full depleted region) และเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบกับบริเวณปลอดพาหะจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกับโฮลเกิดการเคลื่อน โดยโฮลจะเกิดการครีพท์(Drift)ตรงไปยังด้านแคโทดภายใต้การกระทำของสนามไฟฟ้าที่สูงมากและอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ไปยังด้านแอโนด ทำให้เกิดกระแสไหลสว่างจางนอกด้วยกระแสแสงและกระแสมืด จากการทดสอบด้วยผลการตอบสนองสัญญาณกระแสสลับ แสดงให้ทราบว่าสัญญาณเอ๊าท์พุทมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นจนบริเวณปลอดพาหะได้ขยายจนถึงขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งจะพบว่า สัญญาณกระแสเอ๊าท์พุทมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงกระแสอิ่มตัวดังนั้นอิเล็กตรอนกับโฮลจะเคลื่อนที่ได้โดยตรงที่บริเวณปลอดพาหะ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Prof.Dr.Kazunori Sato และ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิตรุ่งเรืองที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำต่องานวิจัยนี้ นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ ดร.รัชนิพร พุกยาภรณ์ พุกกะมาน ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยศรีปทุม อีกทั้งขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานวิจัย รหัสโครงการ MRG 5080004

6. รายการอ้างอิง

- A.K. Srivastava, S.C. Purandare, V.T. Karulkar and B.M. Arora, 1993. "Gain mechanism in GaAs metal-semiconductor-metal photodetector." Inter.J. Opt, 8 : 431-436.
- H. Takano, H. Kimura, T. Ando, S. Niemcharoen, Y. Yasumura, K. Sato, 2000. "Optical response of planar Mo/n-Si/Mo structures with long neutral region and Schottky barriers at both ends," Solid-State Electron. 44 : 216.
- Masui T., Khunkhao S, Kobayashi K, Niemcharoen S, Supadech S, Sato K, 2003. "Photosensing properties of interdigitated metal semiconductor-metal structures with undepleted region." Solid-State Electron. 43 : 1811.
- S. Khunkhao, S. Niemcharoen, M. Duangsang, K.Sato, 2007. "Currents Photoinduced on Laterally Spreading of Space-Charge-Region in Planar Metal-Semiconductor-Metal Structures." Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, 5, 1(Feb).
- SM. Sze, 1981. Physics of semiconductor devices, 2nd ed. New York: John Wiley.