วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์

Thammasat Engineering Journal

ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2557 (Vol. 2 No. 1, January-June 2014) ISSN 2287-0598

วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ มีกำหนดออกเป็นราย 6 เดือน คือ มกราคม-มิถุนายน และกรกฎาคม-ธันวาคม จัดพิมพ์โดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เพื่อเป็นการส่งเสริมและเผยแพร่ความรู้ ผลงานทางวิชาการ งานวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี จัดส่งเผยแพร่ตามสถาบันการศึกษา และหน่วยงานวิจัย ในประเทศไทย

บทความที่ตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง

สถานที่ติดต่อในการจัดส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์

1) จัดส่งบทความผ่านเว็บไซต์ http://tej.engr.tu.ac.th
2) ทางอีเมล์ สามารถส่งไฟล์บทความมาที่ tej@engr.tu.ac.th
3) จัดส่งเป็นเอกสาร 1 ชุด โดยส่งมาที่
   กองบรรณาธิการวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์
   คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
   อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121
   โทร. 0-2564-3001-9 ต่อ 3184

วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์

เจ้าของ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
99 หมู่ 18 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121
http://tej.engr.tu.ac.th

ที่ปรึกษา : คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ (รองศาสตราจารย์ ดร.ประภัสสร์ วังศกาญจน์)

บรรณาธิการ : รองศาสตราจารย์ พินัย ทองสวัสดิ์วงศ์

รองบรรณาธิการ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาลี สันติคุณาภรณ์

กองบรรณาธิการ :

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ ฉันทศิริวรรณ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.จงรักษ์ ผลประเสริฐ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.วิลาศ วูวงศ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ พงศ์สุภสมิทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ชวเดช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ:

รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ	รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม
รองศาสตราจารย์ ดร.มณฑลี ศาสนนันทน์	รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ไพจิตโรจนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพบุษฎ์ เอกแสงศรี	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ
อาจารย์ ดร.กริช เจียมจิโรจน์	อาจารย์ วชิรา พรหมสาขา ณ สกลนคร
อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย	

ฝ่ายประสานงาน: นางสาวมรกต พงศาประเสริฐพร

ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมเถ้าไพโรไลซิสยางล้อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เติมเขม่าดำ

Electrical Resistivity of Poly(vinyl alcohol) Films Filled with Pyrolytic Tyre Char Compared with Carbon Black-Filled Films

ภัทราภรณ์ แย้มขยาย[1)] ดวงกมล ด่านวานิชกุล[2)] และ ภาณุ ด่านวานิชกุล*[2)]

Pattraporn Yamkayai,1) Duangkamol Danwanichakul,2) and Panu Danwanichakul *[2)]

[1)]สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121

[2)]หน่วยวิจัยเฉพาะทางด้านยางธรรมชาติ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121

* Corresponding author. Tel.: +66 (0) 2564 3001 ; fax: +66 (0) 2564 3024

Email address: dpanu@engr.tu.ac.th.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เมื่อผสมด้วยเถ้าไพโรไลซิสจากยางรถยนต์ใช้แล้วเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ผสมด้วยเขม่าดำชนิด N234 และ N330 ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในการขึ้นรูปฟิล์มใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิ-ไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ผลการวิจัยพบว่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่เติมเถ้าไพโรไลซิสมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ฟิล์มที่เติมเขม่าดำชนิด N330 และ N234 ตามลำดับ และเมื่อนำฟิล์มไปดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 0.686 mol/l ในอากาศ พบว่าความต้านทานของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อดูดซึมไอระเหยมากขึ้น โดยความต้านทานของฟิล์มที่เติม N234 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เติม N330 และเถ้าไพโรไลซิส ความต้านทานของฟิล์มที่เติมเถ้าไพโรไลซิสนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้ามากหรือเกือบจะคงที่ระหว่างการดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ น่าจะเป็นเพราะฟองอากาศขนาดเล็กที่พบเป็นจำนวนมากในฟิล์มที่เติมเถ้าไพโรไลซิส สำหรับการเติมสารตัวเติมทุกชนิดพบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานของฟิล์มลดต่ำลงโดยลดลงอย่างมากในช่วงการเติม 5-15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติมเพิ่มมากกว่านั้นความต้านทานจะลดต่ำลงไม่มาก

คำสำคัญ : พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เถ้าไพโรไลซิส ค่าความต้านทานไฟฟ้า การดูดซึม สารระเหย เขม่าดำ

Abstract

In this research, the electrical resistivity of poly(vinyl alcohol) films filled with pyrolytic tire char, carbon black N234 and N330 were investigated. The filler loading was varied to be 5, 10, 15, 20 and 25% of poly(vinyl alcohol) content. The solution of 10% w/v poly(vinyl alcohol) was used to cast films in this study. It was found that electrical resistivity of a film filled with pyrolytic tire char was the highest followed by those filled with N330 and N234, respectively. In a separate experiment, where ethyl alcohol in the air with a concentration of 0.686 mol/l was absorbed in a PVA/filler composite film, the electrical resistivity increased when the absorption continued, the electrical resistivity of a film filled with N234 increased more rapidly when compared with those of N330 and pyrolytic-char-filled films. The latter increased very slowly or was almost constant possibly because there were a lot of small air bubbles throughout the film. For all of the PVA/filler composite films, when the filler content increased, the electrical resistivity decreased. The decrease was significant for filler content between 5 - 15%, beyond that the decrease was not much.

Keywords : Poly(vinyl alcohol): pyrolytic char: electrical resistivity: absorption, volatile matter, carbon black

1. บทนำ

ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางธรรมชาติที่ใช้ผงเขม่าดำเป็นสารเสริมแรงในการผลิตยางล้อรถยนต์ และเนื่องด้วยโครงสร้างกราไฟต์ (Graphitic Characteristics) ที่พื้นผิวของอนุภาคเขม่าดำจึงทำให้ผงเขม่าดำมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี

มีงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่เติมเขม่าดำเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ยกตัวอย่าง เช่น Job และคณะ [1] ศึกษาการนำไฟฟ้าของวัสดุผสมของยางธรรมชาติและผงเขม่าดำสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกดทับ และพบว่าปริมาณของผงเขม่าดำที่ถูกผสมและขนาดของแรงกดทับมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ

นอกจากนี้ Wang และคณะ [2] ได้ศึกษาสมบัติของยางซิลิโคนที่ผสมผงเขม่าดำ โดยพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มแรงกดทับลงบนวัสดุยางที่ผสมผงเขม่าดำเช่นเดียวกัน นอกจากการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกดทับแล้ว ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์อีกด้วย เช่น การศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของพอลิบิวธิวเมทาคริเลต (PBMA) ที่ผสมผงเขม่าดำ โดยศึกษาในสภาวะที่ไอระเหยมีความเข้มข้นต่ำ พบว่าเมื่อพอลิเมอร์ดูดซึมไอระเหยจะเกิดการบวมตัวขึ้นส่งผลให้อนุภาคเขม่าดำกระจายตัวแยกจากกัน ความต้านทานไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น [3] ดังนั้นจึงเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอนุภาคเขม่าดำ หรือการกระจายตัวของอนุภาคที่เปลี่ยนไปส่งผลกระทบต่อค่าการนำไฟฟ้าของโครงสร้างโดยรวม ไม่ว่าจะเกิดขึ้นจากการกดอัดให้อนุภาคอยู่ชิดกันมากยิ่งขึ้นหรือการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่ทำให้มันกระจายออกห่างจากกันมากยิ่งขึ้น หลักการดังกล่าวจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการผลิตเซนเซอร์ได้เป็นอย่างดี

โดยทั่วไปการนำไฟฟ้าของเขม่าดำนั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะ ความบริสุทธิ์ของเขม่าดำ และเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำ [4] นอกจากนี้ในกรณีที่ผสมใน พอลิเมอร์ยังขึ้นกับการกระจายตัวของอนุภาคอีกด้วย การเติมอนุภาคที่นำไฟฟ้าได้ให้กระจายอยู่ในแมทริกซ์ของพอลิเมอร์นั้นอาศัยหลักการของ percolation ซึ่งกล่าวถึงการเชื่อมโยงของกลุ่มอนุภาคทั่วทั้งโครงสร้างของพอลิเมอร์ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างในสองมิติอย่างฟิล์มบาง หรือโครงสร้างในสามมิติทั่วไป การนำไฟฟ้าของคอมพอสิตลักษณะนี้จะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความต่อเนื่องของการเชื่อมโยงดังกล่าว ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคที่เติมลงไป การกระจายตัวของอนุภาค ขนาดของอนุภาค และค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาค [5] สำหรับการกระจายตัวของเขม่าดำนั้น หากทำให้ผิวของผงเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชัน $-COO^-$ ติดอยู่จะช่วยให้อนุภาคกระจายตัวในสารแขวนลอยได้ดีขึ้น และสามารถคงสภาพการกระจายตัวได้นานขึ้น การปรับปรุงการกระจายตัวของผงเขม่าดำด้วยวิธีนี้ ส่งผลให้มีปริมาณอนุภาคเขม่าดำในเส้นใยนาโนของพอลิ ไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผลิตด้วยการปั่นโดยใช้ไฟฟ้าสถิตมากขึ้นเพราะต้องเตรียมจากสารละลายของพอลิเมอร์ที่มีอนุภาคกระจายตัวอยู่ในนั้น จึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโนลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณการเติมอนุภาคที่เพิ่มขึ้น หากเติมผงเขม่าดำที่ไม่มีการปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยรวมมีค่าลดลงแต่ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณการเติมผงเขม่าดำที่มากขึ้นเนื่องในบางบริเวณเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อนำแผ่นเส้นใยนาโนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปดูดซึมไอระเหยของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ พบว่าค่าความต้านทานลดต่ำลงอีกเพราะไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์นำไฟฟ้าได้ [6]

จากประโยชน์ของเขม่าดำดังกล่าว จึงเกิดแนวคิดที่จะนำเถ้า (char) ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางล้อรถยนต์ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่มีองค์ประกอบของเขม่าดำจำนวนมากนอกเหนือจากผลิตภัณฑ์หลักซึ่งคือแก๊สและน้ำมัน [7] จึงน่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ในลักษณะเดียวกันกับผงเขม่าดำ โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ตรวจวัดไอระเหยอินทรีย์ ในที่นี้เลือกที่จะศึกษาระบบของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมเถ้าไพโรไลซิสดังกล่าวโดยเป็นการใช้เถ้าตามที่ได้รับมา (as-received) มิได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติใดๆ ก่อนเติมลงในพอลิเมอร์ เปรียบเทียบกับการเติมเขม่าดำชนิด N234 และ N330 และยังพิจารณาการเปลี่ยนสมบัติการนำไฟฟ้าเมื่อคอมพอสิตที่ได้ถูกนำไปสัมผัสกับไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นสารมีขั้วเช่นเดียวกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

2. วิธีการวิจัย

2.1. สารเคมีที่ใช้

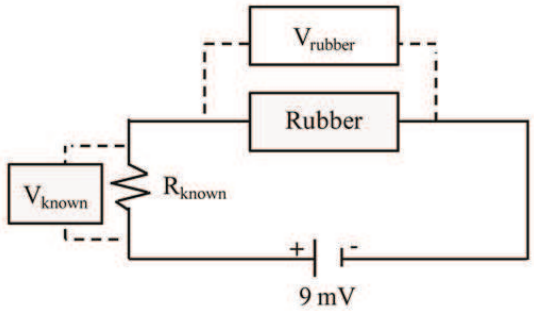
สารเคมีที่ใช้งานวิจัยนี้ ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ชนิดละลายได้ในน้ำเย็น (Polyvinyl Alcohol) (M.W. 72000) จากบริษัท Merck, ผงเขม่า ดำชนิด N234 จากบริษัท Thai Tokai Carbon Product ผงเขม่าดำชนิด N330 จากบริษัท Thai Carbon Black, เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 100% โดยน้ำหนัก เถ้าไพโรไลซิสจากยางล้อ (90% โดยปริมาตรของเถ้า มีขนาดอนุภาคทุติยภูมิเฉลี่ย 201.84±0.88 μm) และมีองค์ประกอบคร่าวๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

2.2. การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่เติมเขม่าดำและเถ้าไพโรไลซิส

เตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยละลายพอลิเมอร์ 5 กรัมในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 30 นาที เติมเขม่าดำหรือเถ้าไพโรไลซิสลงในสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกวนให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเทสารละลายที่ผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดลงในจานแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ลอกฟิล์มออกจากจาน

2.3. ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในฟิล์ม

ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในแผ่นฟิล์มที่ได้จากการเตรียมในแต่ละเงื่อนไข โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตัลรุ่น BW1008-500X ส่องบนผิวของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์



รูปที่ 1 วงจรอนุกรมเพื่อตรวจวัดค่าความต้านทาน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเถ้าจากกระบวนการไพโรไลซิสยางใช้แล้วแบบไม่บดที่สภาวะควบคุมอุณหภูมิ 380-420 °C และความดัน 30-100 ปาสคาล ใน Horizontal reactor ภายใต้บรรยากาศที่มีไนโตรเจน

องค์ประกอบ	(%)
เถ้า	15.62
สารระเหย	11.27
Fixed carbon	71.22
กำมะถัน	3.27

2.4. การวัดความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม

ตรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มซึ่งมีขนาด 2 x 2 เซนติเมตร โดยใช้ดิจิตัลมัลติมิเตอร์ ผ่านวงจรอนุกรมดังรูปที่ 1

ในที่นี้ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มคำนวณจากสมการที่ 1 และค่าที่รายงานได้จากการวัดซ้ำ 5 ครั้ง

$$R_{rubber} = \frac{V_{rubber}}{V_{known}} \, x \, R_{known} \qquad (1)$$

เมื่อ R_{rubber} คือความต้านทานของฟิล์มยาง, R_{known} คือความต้านทานที่ทราบค่าซึ่งต่ออยู่กับระบบ V_{rubber} คือความต่างศักย์ที่ได้จากการวัดคร่อมตัวต้านทานที่ทราบค่า และ V_{known} คือความต่างศักย์ที่ได้จากการวัดคร่อมฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ตามลำดับ

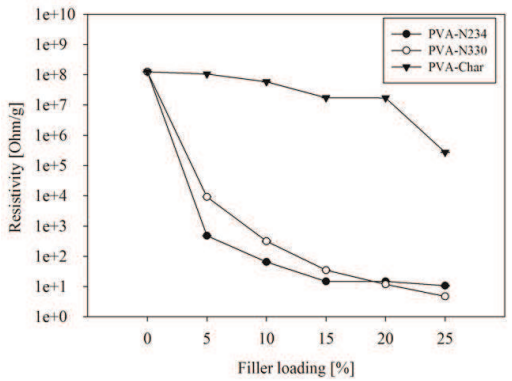
2.5. การวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเมื่อนำไปดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์

แผ่นฟิล์มจะถูกทดสอบในขณะดูดซึมไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ ที่ความเข้มข้น 0.686 mol/l โดยวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยดิจิตัลมัลติมิเตอร์ทุกๆ 30 วินาที เป็นเวลา 5 นาที และค่าที่รายงานได้จากการวัดซ้ำ 5 ครั้ง

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1. ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ค่าความต้านทานของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีสารตัวเติมเขม่าดำและเถ้าไพโรไลซิส โดยไม่มีการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมแสดงในรูปที่ 1 เมื่อปริมาณสารตัวเติมเท่ากับ 20-25% ของน้ำหนักพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้ใช้



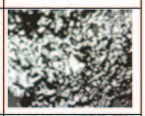
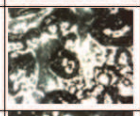
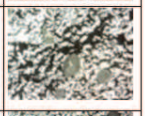
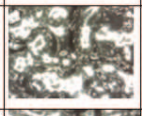
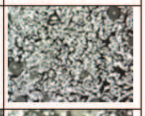
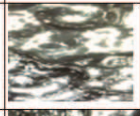
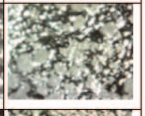
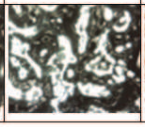
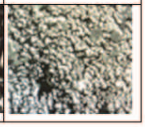
รูปที่ 1 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมสารตัวเติม เขม่าดำ N234, N330 และเถ้าไพโรไลซิสยางล้อ

ความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 10 %w/v

รูปที่ 1 แสดงความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มซึ่งเฉลี่ยแล้วโดยมีค่าเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ย 0.5-2.2%, 0-3.9% และ 0-2.1% สำหรับฟิล์มที่เติม N234, N330 และเถ้าไพโรไลซิสตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมสารตัวเติมทุกชนิดมีพฤติกรรมในทำนองเดียวกัน กล่าวคือฟิล์มที่มีสารตัวเติมมีความต้านทานไฟฟ้าลดลงจากกรณีที่ไม่มีสารตัวเติมและความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงตามปริมาณสารตัวเติมที่เติม อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ผสมเถ้าไพโรไลซิสยางล้อให้ค่าความต้านทานมีสูงที่สุด รองลงมาคือฟิล์มที่เติมเขม่าดำชนิด N330 และ N234 ตามลำดับ เห็นได้ชัดเจนว่าการนำไฟฟ้าของเถ้าไพโรไลซิสยางล้อนั้นด้อยกว่าผงเขม่าดำทั้งสองชนิดเป็นอย่างมาก เนื่องจากสาเหตุหลักสองประการนั่นคือ สิ่งปนเปื้อนในเถ้า และลักษณะความเป็นกราไฟต์ที่ผิวของอนุภาค สำหรับสิ่งปนเปื้อนนั้นมีรายงานว่าเถ้าไพโรไลซิสยางล้อมีทั้งกำมะถันที่ใช้เป็นสารทำให้ยางคงรูปและเถ้าของสารอนินทรีย์ เช่น ซิลิกา ซึ่งก็เป็นสารตัวเติมเสริมแรงอีกชนิดหนึ่งในยางล้อรถยนต์และสังกะสีซึ่งเป็นสารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ยางคงรูปในยางอีกปริมาณเล็กน้อย [7] สำหรับลักษณะกราไฟต์ที่ผิวของเถ้าไพโรไลซิสยางล้อนั้น พบว่ามีความไม่สมบูรณ์เทียบเท่ากับลักษณะกราไฟต์ที่ผิวของเขม่าดำ [4] ผงเขม่าดำชนิด N234 มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเพียง 19 นาโนเมตรซึ่งเล็กกว่าผงเขม่าดำชนิด N330 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 28 นาโนเมตร จึงทำให้มีพื้นที่ผิวที่แสดงลักษณะกราไฟต์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณการเติมที่เท่ากัน

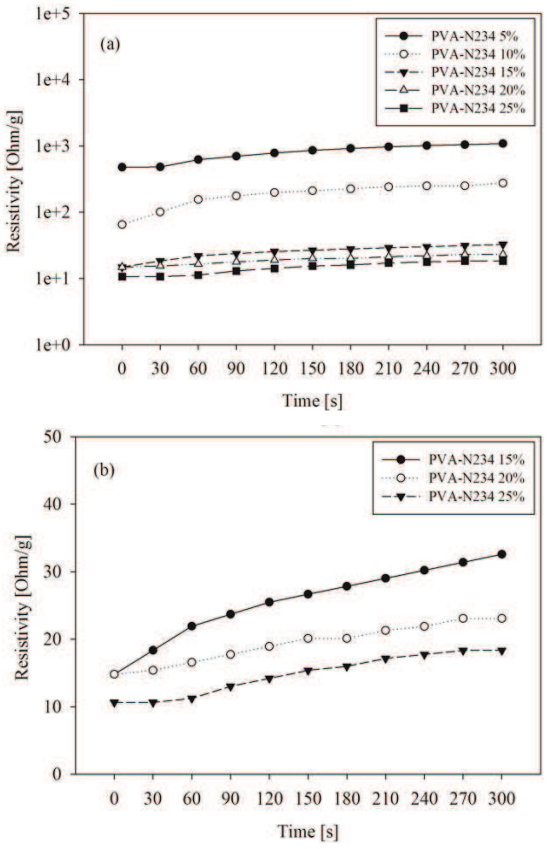
เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความต้านทานของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมสารตัวเติมเขม่าดำ N234 สูงกว่ากรณีการเติมเขม่าดำ N330 ที่ 20% และ 25% ซึ่งน่าจะเป็นเพราะเมื่อเติมสารตัวเติมปริมาณมากขึ้น ผงเขม่าดำ N234 ที่มีขนาดเล็กกว่ามีโอกาสเกาะกลุ่มกันเองเกิดเป็นอนุภาคทุติยภูมิที่ใหญ่ขึ้นได้มากกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของอนุภาคในพอลิเมอร์ไม่ดีเท่าที่ควรสอดคล้องกับค่า DBP Adsorption ที่รายงานโดยบริษัทผู้ผลิตสำหรับ N234 และ N330 ไว้เท่ากับ 124 และ 100 cm^3/100 g หากค่านี้มีค่าน้อยแสดงว่าอนุภาคมีแนวโน้มเกาะกลุ่มกันน้อยกว่า ดังนั้นความต้านทานไฟฟ้าไฟฟ้าของ N234 มีโอกาสสูงกว่ากรณีของการเติมเขม่าดำ N330 นอกจากนี้ในตารางที่ 2 ยังแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เติมเถ้าไพโรไลซิสมีขนาดฟองอากาศเล็กและมีจำนวนมากกว่าฟิล์มที่เติมเขม่าดำทั้ง 2 เกรดซึ่งอาจส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มที่ใส่ตัวเติมเขม่าดำและเถ้าไพโรไลซิสถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 300เท่า

ปริมาณสารตัวเติม	สัดส่วนสารตัวเติมในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 10%		
	N234	N330	Char
5%			
10%			
15%			
20%			
25%			

3.2. ความต้านทานไฟฟ้าของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมเขม่าดำและที่ผสมเถ้าไพโรไลซิสเมื่อนำไปดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์

เมื่อพิจารณารูปที่ 2(a) พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมเขม่าดำชนิด N234 ในปริมาณ 5-10% ระหว่างดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเติมปริมาณ 10% จะทำให้ค่าการต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 วินาทีแรก เนื่องจากเมื่อฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดูดซึมไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ที่เป็นสารมีขั้วเหมือนกัน จะทำให้ยางเกิดการบวมตัว ส่งผลให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคเขม่าดำที่อยู่ในฟิล์มมากขึ้น ในกรณีนี้แผ่นฟิล์มก่อนและหลังการดูดซับไอระเหยมีความหนาประมาณ 0.624 และ 0.691 มิลลิเมตรตามลำดับ ค่าความต้านทานจึงเพิ่มขึ้น

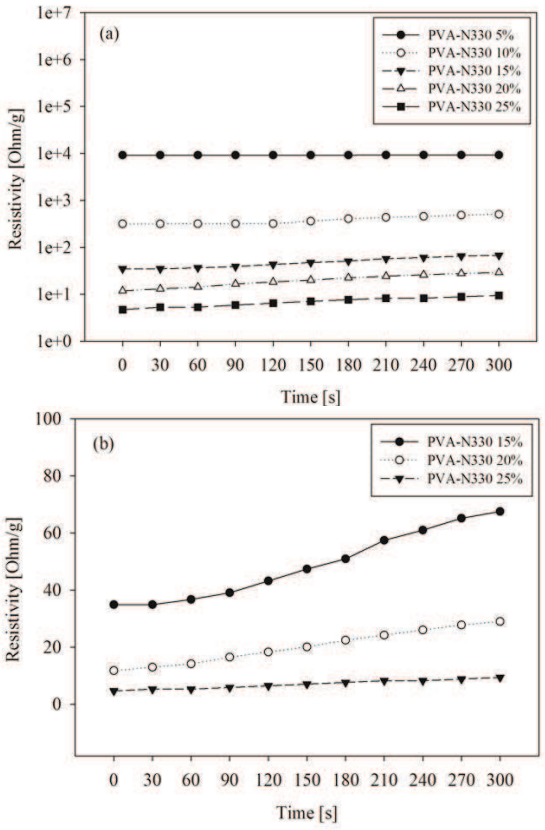


รูปที่ 2 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมเขม่าดำ N234 ระหว่างดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 5 นาที (a) เปรียบเทียบครบทุกตัวอย่าง (b) ขยายสเกลสำหรับตัวอย่างที่มีสารตัวเติมปริมาณมาก

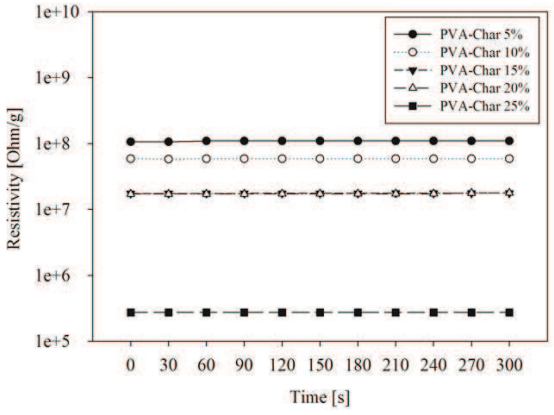
ผลที่ได้สำหรับฟิล์มนี้แตกต่างจากการดูดซึมไอระเหยของเส้นใยนาโนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมเขม่าดำ กล่าวคือเมื่อนำแผ่นเส้นใยนาโนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปดูดซึมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ พบว่าค่าความต้านทานลดต่ำลงอย่างฉับพลันเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [6] แสดงให้เห็นถึงกลไกการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันไปเมื่อพื้นผิวและโครงสร้างของวัสดุดูดซึมไอระเหยแตกต่างกัน ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าในกรณีของเส้นใยนาโนนั้นเส้นทางการนำไฟฟ้าจะส่งผ่านเส้นใยขนาดเล็กมากซึ่งมีอนุภาคเขม่าดำเรียงต่อกันหนาแน่นตามแนวเส้นใย เมื่อเกิดการดูดซึมไอระเหยที่นำไฟฟ้าได้จึงทำให้ไอเหล่านั้นกระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ได้ทั่วถึง ถึงแม้จะไปทำให้พอลิเมอร์บวมตัวและระยะห่างระหว่างอนุภาคเขม่าดำเพิ่มขึ้น แต่โมเลกุลของไอระเหยเองเป็นตัวเชื่อมเส้นทางการนำไฟฟ้า ในขณะที่ในโครงสร้างฟิล์มการกระจายตัวของอนุภาคจะไม่ดีเท่าเส้นใย เพราะเป็นการกระจายไปทั่วแบบสุ่มไม่ได้เรียงไปตามแนวเส้นใย เมื่อเกิดการดูดซึมไอระเหยซึ่งก็ต้องค่อยๆ แพร่เข้าไปในพอลิเมอร์ก็จะทำให้พอลิเมอร์ขยายตัวและดันให้อนุภาคออกห่างจากกัน โดยที่ปริมาณของไอระเหยยังไม่มากพอที่จะเชื่อมเส้นทางเดินของการนำไฟฟ้า

และยังพบด้วยว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมเขม่าดำชนิด N234 ในปริมาณ 15-25% เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากการเติมเขม่าดำในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของฟิล์มมีความแข็งแรงขึ้น เมื่อนำไปดูดซึมไอระเหยฟิล์มจึงขยายตัวได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

สำหรับผลของ N330 แสดงในรูปที่ 3 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมเขม่าดำชนิด N330 ระหว่างดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณการเติมที่ 15% จากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะมีแนวโน้มลดลง ผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับกรณีการเติมด้วยเขม่าดำชนิด N234 และเมื่อเปรียบเทียบผลการดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ของตัวอย่างที่เติมเขม่าดำ N234 และ N330 ที่ปริมาณการเติม 15% เท่ากันพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของเขม่าดำ N330



รูปที่ 3 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ผสมเขม่าดำ N330 ระหว่างดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 5 นาที (a) เปรียบเทียบครบทุกตัวอย่าง (b) ขยายสเกลสำหรับตัวอย่างที่มีสารตัวเติมปริมาณมาก



รูปที่ 4 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ผสมเถ้าไพโรไลซิส ระหว่างดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 5 นาที

มีค่ามากกว่าการเติมเขม่าดำ N234 อาจเนื่องจากที่ปริมาณการเติมสารตัวเติมเท่านี้ เป็นปริมาณที่มีเขม่าดำอยู่ในโครงสร้างฟิล์มมากเพียงพอและไม่ทำให้โครงสร้างแข็งเท่ากับการเติมเขม่าดำ N234 ฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จึงขยายตัวได้มากกว่าซึ่งโดยทั่วไปอนุภาคเขม่าดำขนาดเล็กจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตได้มากกว่าเขม่าดำที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

รูปที่ 4 แสดงความต้านทานของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมเถ้าไพโรไลซิส ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับเขม่าดำทั้งสองเกรด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้ามาก เนื่องจากพบว่าฟิล์มพอลิไวนิลแอกอฮอล์ที่เติมเถ้าไพโรไลซิสมีฟองอากาศขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 2 ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคของเถ้า ค่าความต้านทานไฟฟ้าจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักระหว่างดูดซึมไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมสารตัวเติม 3 ชนิด คือผงเขม่าดำ N234, N330 และเถ้าไพโรไลซิสที่ได้จากยางล้อใช้แล้ว และทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อนำฟิล์มไปสัมผัสกับไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ จากการศึกษาพบว่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทั้งสามชนิด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมทั้งสามชนิดที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนและมีโครงสร้างบางส่วนที่ผิวอนุภาคคล้ายคลึงกับกราไฟต์ และพบว่าผงเขม่าดำที่มีขนาดเล็กสามารถเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าขนาดใหญ่ และการเติมเถ้าไพโรไลซิสทำได้ยากกว่าการเติมผงเขม่าดำเพราะเกิดฟองอากาศได้ง่ายในพอลิเมอร์ จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านไฟฟ้าในที่สุด ดังนั้นหากจะนำเถ้าไพโรไลซิสไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดใดๆ จึงควรศึกษาการปรับปรุงผิวของอนุภาคก่อน น่าจะช่วยลดการเกิดฟองอากาศ และทำให้เถ้ามีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ ซึ่งน่าจะเป็นหนทางในการเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าของเถ้าไพโรไลซิส อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจากผลที่ได้การนำเถ้าไพโรไลซิสไปใช้เป็นสารตัวเติมทั้งหมดอาจไม่สามารถลดค่าการนำไฟฟ้าได้มากเท่าที่ต้องการ ดังนั้นจึงอาจเน้นไปที่การใช้สารตัวเติมผสมระหว่างผงเขม่าดำและ

เถ้าที่ได้จากการไพโรไลซิส จึงเป็นการเพิ่มการใช้ประโยชน์จากเถ้าไพโรไลซิสได้ ในขณะเดียวกันก็เป็นการลดค่าใช้จ่ายในเรื่องต้นทุนของเขม่าดำ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท Thai Tokai Carbon Product และบริษัท Thai Carbon Black ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงเขม่าดำ N234 และ N330 ตามลำดับ และขอบคุณโครงการการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่สนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Job AE, Oliveira FA., Alves N, Giacometti J.A., Mattoso L.H.C. Conductive composites of natural rubber and carbon black for pressure sensors. Synthetic Met. 2003;135-136:99-100.

[2] Wang SL, Wang P, Ding TH. Development of wireless compressive/relaxation-stress measurement system integrated with pressure-sensitive carbon black-filled silicone rubber-based sensors. Sensor Actuat A-Phys. 2010;157:36-41.

[3] Dong XM, Fu RW, Zhang MQ, Zhang B, Rong MZ. Electrical resistance response of carbon black filled amorphous polymer composite sensors to organic vapor at low concentrations. Carbon 2004;42:2551–2559.

[4] Pantea D, Darmstadt H, Kaliaguine S, Roy C Heat-treatment of carbon blacks obtained by pyrolysis of used tires. Effect on the surface chemistry, porosity and electrical conductivity. J Anal Appl Pyrol. 2003; 67(1): 55-76.

[5] Danwanichakul P, Glandt ED. Percolation and jamming in structures built through sequential deposition of particles. J Colloid Interf Sci. 2005;283:41 –48.

[6] Wongdao W and Danwanichakul P. Electrical Resistivity of poly (vinyl alcohol) nanofibrous structures filled with carbon black, self-dispersible carbon black and carbon nanotube, KKU Eng Jnl. 2012;39(3):301-309. (in Thai)

[7] Poonikom A. Preparation and investigation of activated carbon derived from pyrolytic used tire char [MSc thesis]. Faculty of Engineering; Thammasat University; 2012. (In Thai).

การปรับปรุงกระบวนการผลิตสวิทช์โอเวอร์ไดร์

Manufacturing Process Improvement of Over Drive's Switch

อภิวัฒน์ มุตตามระ[1*] ณิชาภา บุญพิทักษ์[2]

Apiwat Muttamara[1*] Nichapa Boonpitak[2]

[1,2]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี

[1,2]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Prathumthani

E-mail: mapiwat@engr.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการลงทุนด้านอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการแข่งขันกันอย่างต่อเนื่อง จึงต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในส่วนของกระบวนการประกอบสวิทช์โอเวอร์ไดร์ให้สามารถดำเนินการผลิตสอดคล้องกับปริมาณความต้องการซื้อของลูกค้า การปรับปรุงได้นำหลักการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา เทคนิค ECRS (การกำจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออกไป การรวมขั้นตอนหลายส่วนเข้าด้วยกัน การจัดขั้นตอนใหม่ และการปรับปรุงขั้นตอนให้ง่ายขึ้น) เพื่อปรับปรุงขั้นตอนการประกอบสวิทช์ โดยเปลี่ยนอุปกรณ์การทำงานและลดขั้นตอนโดยปรับเปลี่ยนวิธีการทำงาน ผลการปรับปรุงสามารถลดเวลาประกอบจาก 50.49 วินาทีลดลงเหลือ 36.00 วินาที เวลาที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 28.70

คำหลัก: การปรับปรุง, สวิทช์โอเวอร์ไดร์, ECRS, การศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา

Abstract

Nowadays, the investment for industry in Thailand and has been competing continuously. Over Drive's Switch assembly must be improved in order to achieve the higher production efficiency and to meet customer's demand. The improvement using principle of motion and time study and ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange and Simplify) were applied in the switch assembly process. The equipment were changed and operation work procedure were reduced for improvement. The results show that that the assembly time can be reduced from 50.49 to 36.00 second or 28.70 percent can be reduced.

Keywords: Improvement, Over Drive's Switch, ECRS, Motion and Time Study

1. บทนำ

ในปัจจุบันการลงทุนทางด้านอุตสาหกรรมจากต่างประเทศในประเทศไทยมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปัญหาทางด้านต้นทุนที่ใช้ในการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นและยังต้องเผชิญกับปัญหาในเรื่องของค่าจ้างและค่าครองชีพที่สูงขึ้น ส่งผลให้เป็นการเพิ่มภาระต้นทุนที่ใช้ในการผลิต ดังนั้นเพื่อความอยู่รอดขององค์กรจึงต้องมีการพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง สถานประกอบการที่ใช้ในกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตสวิทช์โอเวอร์ไดร์สำหรับรถยนต์ ซึ่งปัจจุบันไม่สามารถผลิตได้ทันตามความต้องการซื้อของลูกค้าจึงทำให้ต้องมีการศึกษาการปรับปรุงกระบวนการทำงานเพื่อให้สามารถดำเนินการผลิตให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในส่วนของกระบวนการผลิตสวิทช์โอเวอร์ไดร์ โดยนำหลักการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา การจัดสมดุลการผลิตโดย ECRS มาประยุกต์ใช้ปรับปรุงวิธีการทำงาน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การศึกษางาน (Work Study)

2.1.1 การศึกษาวิธีการทำงาน (Method Study)

การศึกษาวิธีการทำงานเป็นการบันทึกและวิเคราะห์วิธีการทำงานที่เป็นอยู่ หรือเสนอใหม่อย่างมีระบบเป็นเครื่องมือเพื่อพิจารณา และประยุกต์ให้ง่ายขึ้นรวมทั้งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ ลดค่าใช้จ่าย โดยการศึกษาวิธีการจะช่วยปรับปรุงกระบวนการ การวางผังโรงงาน ออกแบบโรงงานและอุปกรณ์ ช่วยลดความเมื่อยล้าของพนักงาน ยึดหลักการยศาสตร์ (Ergonomic) และสิ่งแวดล้อมในการทำงาน [1, 2, 3, 4, 5, 6]

2.1.2 การวัดผลงาน (Work Measurement)

การวัดผลงาน คือ การหาเวลาที่เป็นมาตรฐานในการทำงาน (Standard Time) โดยเทคนิคการวัดผลงานที่นิยมใช้เนื่องจากความแม่นยำในการเก็บข้อมูลคือ การศึกษาเวลาโดยตรง หมายถึง การจับเวลาขณะพนักงานปฏิบัติงาน จากนั้นคำนวณเวลาทำงานปกติ (Normal Time) ประเมินอัตราการทำงาน (Rating) และคิดเวลาเผื่อ (Allowance) แล้วจึงคำนวณเวลามาตรฐาน (Standard Time) [1, 2, 3, 4, 5]

2.2 การวิเคราะห์กระบวนการ (Process Analysis)

แผนภูมิกระบวนการผลิตโดยสังเขป และแผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการ โดยมีสัญลักษณ์แทนประเภทของการทำงาน [1, 2, 3] ซึ่งสามารถดูความหมายของสัญลักษณ์ได้ในภาพที่ 1 (ด้านบน)

2.3 หลักเกณฑ์ ECRS

หลักการที่สามารถใช้ได้กับการปรับปรุงกระบวนการทั้งหลาย ส่วนใหญ่ใช้วิธี ECRS ซึ่งรายละเอียดประกอบด้วย [2]

Eliminate – การกำจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออกไป

Combine – การรวมขั้นตอนหลายส่วนเข้าด้วยกัน

Rearrange – การจัดขั้นตอนใหม่

Simplify – การปรับปรุงขั้นตอนให้ง่ายขึ้น

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สภาพของปัญหา

พนักงานทำงานประกอบสวิทช์โอเวอร์ไดร์ซึ่งขั้นตอนต่างๆ แสดงในภาพที่ 1 โดยใช้เวลาประกอบสวิทช์แต่ละตัวที่ 50.49 วินาที

3.2 การวิเคราะห์สาเหตุปัญหาและการปรับปรุง

ภาพที่ 1 แสดงการทำงานของมือขวาและมือซ้ายในการประกอบสวิทช์โอเวอร์ไดร์ การศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิตสวิทช์โอเวอร์ไดร์ พบว่าพบว่ามือข้างขวามีขั้นตอนการทำงาน 23 ขั้นตอนย่อย ซึ่งมากกว่ามือข้างซ้ายที่มีขั้นตอนการทำงาน 20 ขั้นตอนย่อย ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเมื่อยล้า [3]

ภาพที่ 2 แสดงวิธีการทำงานในขั้นตอนการทาจารบีที่เบส (Base) ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้ 1. ปาดจารบีลงบนแท่นวางจิ๊ก 2.แต้มจารบีจากแท่นลงบนจิ๊ก 3.ติดตั้งชิ้นงานเบสบนจิ๊ก 4.ทาจารบีบนชิ้นงานเบส จากการวิเคราะห์พบว่าการปาดจารบีลงบนแท่นวางจิ๊กสามารถทำได้ครั้งละหลายตัว จากนั้นนำมาใช้แต้มลงบนจิ๊กทีละตัว ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์ปาดจารบีลงบนแท่นได้ตามภาพที่ 3 ซึ่งปาด 1 ครั้งสามารถลงบนแท่นวางจิ๊กได้ 20 ตัว

ผลรวม	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง		สิ่งที่ลด	
	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
การทำงาน	13	21				
การเคลื่อนย้าย	0	0				
การพักคอย	5	2				
การเก็บรักษา	2	0				
รวม	20	23				

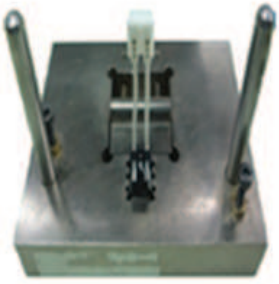
มือซ้าย	เวลา	มือขวา	เวลา
1. หยิบจิ๊กดูดฝุ่น	-	1. ติดตั้งเบส (Base) ที่จิ๊กดูดฝุ่น	2.68
2. หยิบเคส (Case)	-	2. ติดตั้งเคส (Case) ที่จิ๊กดูดฝุ่น	2.75
3. ประกอบเคส (Case)	3.99	3. รอ	-
4. หยิบสไลด์เดอร์ (Slider)	-	4. ติดตั้งสไลด์เดอร์ (Slider) ที่จิ๊กดูดฝุ่น	4.49
5. ประกอบสไลด์เดอร์ (Slider)	0.87	5. รอ	-
6. รอ	-	6. ติดตั้งแอ็คชั่นสปริง (Action Spring) ที่จิ๊กดูดฝุ่น	1.93
7. จับแอ็คชั่นสปริง (Action Spring)	-	7. ประกอบแอ็คชั่นสปริง (Action Spring)	4.77
8. รอ	-	8. ติดตั้งบรัช (Brush) ที่จิ๊กดูดฝุ่น	2.57
9. จับบรัช (Brush)	-	9. ประกอบบรัช (Brush)	2.61
10. รอ	-	10. เทสบรัช (Test Brush)	1.02
11. รอ	-	11. ติดตั้งรีเทิร์นสปริง (Return Spring) ที่จิ๊กดูดฝุ่น	4.29
12. รอ	-	12. ประกอบรีเทิร์นสปริง (Return Spring)	1.50
13. หยิบจิ๊กดูดฝุ่นเบส (Base)	-	13. หยิบเบส (Base) ออกจากจิ๊กดูดฝุ่น	0.87
14. ปลดล็อกส่วนล่าง (Lower) จิ๊กอาร์บี	-	14. ติดตั้งเบส (Base) ที่ส่วนล่าง (Lower)	1.66
15. จับจิ๊กอาร์บี	-	15. ปาดอาร์บี	1.09
16. จับจิ๊กอาร์บี	-	16. แต้มอาร์บี	1.09
17. จับจิ๊กอาร์บี	-	17. ทาอาร์บีที่เบส (Base)	0.94
18. ปลดล็อคส่วนล่าง (Lower) จิ๊ก	-	18. หยิบเบส (Base) จากส่วนล่าง (Lower) จิ๊ก	4.09
19. หยิบส่วนบน (Upper) จิ๊ก	-	19. ติดตั้งเบส (Base) ที่ส่วนบน (Upper) จิ๊ก	
20. เลื่อนประกอบ	-	20. ประกอบสวิทช์	3.89
		21. หยิบส่วนบน (Upper) จิ๊กออก	
		22. หยิบสวิทช์และตรวจเช็คสวิทช์	2.53
		23. วางสวิทช์ที่ถาด	1.02

ภาพที่ 1 การทำงานของมือซ้ายและมือขวาของการประกอบสวิทช์โอเวอร์ไดร์

ภาพที่ 4 แสดงจิ๊กดูดฝุ่นก่อนการปรับปรุง การเป่าลมและดูดฝุ่นชิ้นส่วนประกอบมีจำนวน 6 ชิ้น ได้แก่ เบส (Base), เคส (Case), สไลด์เดอร์ (Slider), แอ็คชั่นสปริง (Action Spring), บรัช (Brush), รีเทิร์นสปริง (Return Spring) พนักงานต้องหยิบชิ้นส่วนทั้ง 6 ชิ้น ไปใส่ในจิ๊กดูดฝุ่นเพื่อรอประกอบสวิทช์หนึ่งตัว จากการวิเคราะห์พนักงานจะเสียเวลาในการเป่าและดูดฝุ่นทีละตัวจึงใช้หลักการรวมเข้าด้วยกัน (Combine) โดยออกแบบ อุปกรณ์ดังภาพที่ 5 ซึ่งสามารถทำได้ครั้งละ 20 ตัว โดยการเทชิ้นส่วนที่ต้องใช้ใส่ในจิ๊กดูดฝุ่นทั้ง 3 ชิ้น ส่วนอีก 2 ชิ้นไม่สามารถเทใส่จิ๊กดูดฝุ่นได้ทันที

1. ปาดจารบีลงบนแท่นวางจิ๊ก

2. แต้มจารบีจากแท่นลงบนจิ๊ก



3. ติดตั้งชิ้นงานเบสลงบนจิ๊ก

4. ทาจารบีบนชิ้นงานเบส

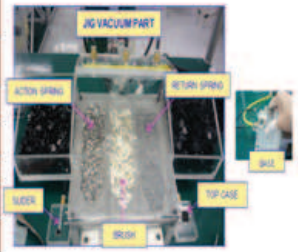
ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทาจารบีที่ชิ้นงานเบส

ภาพที่ 3 อุปกรณ์ปาดจารบีลงบนแท่นหลังการปรับปรุง

ภาพที่ 4 จิ๊กดูดฝุ่นก่อนการปรับปรุง

ภาพที่ 5 จิ๊กดูดฝุ่นหลังการปรับปรุง

ผลรวม	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง		สิ่งที่ลด	
	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
การทำงาน	13	21	13	14	0	7
การเคลื่อนย้าย	0	0	0	0	0	0
การพักคอย	5	2	0	1	5	1
การเก็บรักษา	2	0	2	0	0	0
รวม	20	23	15	15	5	8



มือซ้าย					เวลา					เวลา	มือขวา
1.หยิบสไลด์เดอร์ (Slider) ติดตั้งที่จิ๊กดูดฝุ่น	●				2.76	●				2.76	1.หยิบเคส (Case) ติดตั้งที่จิ๊กดูดฝุ่น
2.ประกอบสไลด์เดอร์ (Slider)	●				2.68	●				2.68	2.ประกอบเคส (Case)
3.จับแอ็คชันสปริง (Action Spring)	●				-	●				3.99	3.แอ็คชันสปริง (Action Spring)
4.จับบรัช (Brush)	●				-	●				4.54	4.ประกอบบรัช (Brush)
5.หยิบจิ๊กประกอบ	●				-	●				0.87	5.เทสบรัช (Test Brush)
6.จับรีเทิร์นสปริง (Return Spring)				●	-	●				1.97	6.ประกอบรีเทิร์นสปริง (Return Spring)
7. ปาดจารบี	●				0.52				●	-	7.รอ
8.แต้มจารบี	●				1.08	●				1.52	8.หยิบส่วนบน (Upper) จิ๊กจากจิ๊กดูดฝุ่น
9.ทาจารบี	●				-	●				0.94	9.ทาจารบี
10.วางจิ๊กแต้มจารบี	●				-	●				3.97	10.ติดตั้งส่วนบน (Upper) จิ๊ก
11.ประกอบสวิทช์	●				-	●					11.ประกอบสวิทช์
12.หยิบเบส (Base) และติดตั้งที่ส่วนบน (Upper) จิ๊ก	●				-	●				3.32	12.หยิบส่วนบน (Upper) จิ๊กออก
13.หยิบจิ๊กดูดฝุ่น				●	-	●				4.28	13.ติดตั้งส่วนบนจิ๊ก (Upper Jig) ที่จิ๊กดูดฝุ่น
14.วางสวิทช์	●				-	●				2.53	14.หยิบสวิทช์และตรวจเช็คสวิทช์
15.ดึงสไลด์	●				-	●				1.02	15.วางที่ถาด

ภาพที่ 6 การทำงานของทั้งสองมือหลังการปรับปรุง

เพราะเป็นการดูดฝุ่นเฉพาะที่ จึงยังคงต้องมีการหยิบใส่จิ๊กดูดฝุ่น

3.3 การออกแบบวิธีการทำงานใหม่

จากการได้ออกแบบอุปกรณ์ช่วยทำงานขึ้นใหม่จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานการทำงานใหม่ ซึ่งสามารถดูได้จากภาพที่ 6 ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการทำงานทั้งสองมือเหลือ 15 ขั้นตอน และทั้งสองมือมีขั้นตอนการทำงานที่เท่ากัน

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ใช้หลักการ ECRS ได้แก่

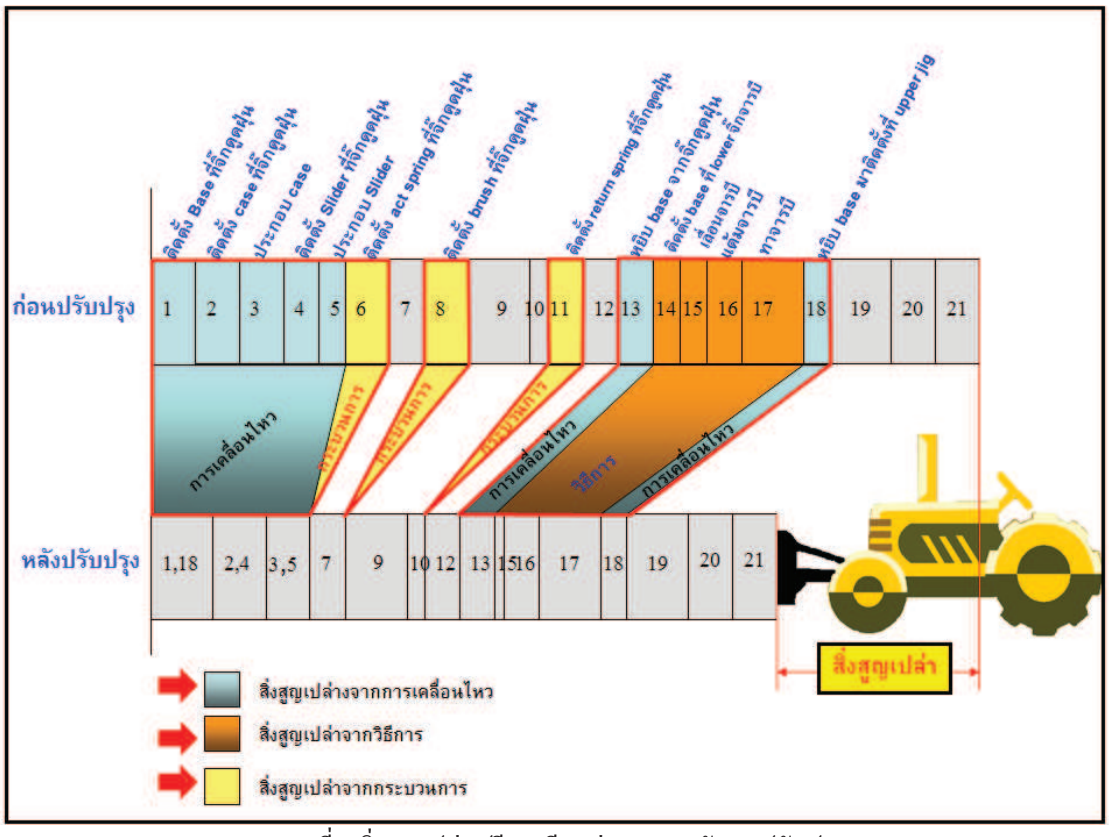
E (Eliminate) ได้แก่ กำจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นในส่วนของการดูดฝุ่นชิ้นส่วนประกอบทั้ง 6 ชิ้นส่วน และการรวมขั้นตอนการทาจารบีจาก 6 ขั้นตอนลดลงเหลือ 3 ขั้นตอน

C (Combine) ได้แก่ การออกแบบอุปกรณ์ช่วยประกอบรวมขั้นตอนการติดตั้งเบส (Base) ที่ส่วนบน (Upper) จิ๊ก และการดูดฝุ่นเบส (Base) เข้าไว้ด้วยกัน

R (Rearrange) ได้แก่ ลดเวลาการประกอบสวิทช์โดยก่อนปรับปรุงมี 21 ขั้นตอนย่อยหลังจากปรับปรุงแล้วสามารถลดขั้นตอนการทำงานเหลือ 15 ขั้นตอนย่อย

S (Simplify) คือ การปรับปรุงขั้นตอนการทำงานทั้งสองมือให้สมดุลกัน ซึ่งสามารถลดเวลาประกอบจาก 50.49 วินาที ลดลงเหลือ 36 วินาที เวลาที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 28.70

ภาพที่ 7 แสดงสิ่งสูญเปล่าเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง จะเห็นได้ชัดเจนว่าการเคลื่อนไหว 5 ขั้นตอน สามารถลดลงเหลือเพียง 3 ขั้นตอน กระบวนการสามารถถูกกำจัดไปทั้งสิ้น 3 กระบวนการ และสามารถลดวิธีการ



ภาพที่ 7 สิ่งสูญเปล่าเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง

ลง 1 ขั้นตอน จากก่อนปรับปรุงซึ่งมีทั้งหมด 21 ขั้นตอนย่อย เหลือหลังการปรับปรุง 15 ขั้นตอนย่อย และสามารถลดเวลาประกอบจาก 50.49 วินาที เหลือ 36 วินาที

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิควิศวกรรมอุตสาหการ คือ การศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา และหลักการ ECRS ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการทำงานจากการทำงานทั้งสองมือไม่เท่ากัน โดยมือซ้ายมี 21 ขั้นตอนและมือขวามี 23 ขั้นตอน เหลือทั้งสองมือที่มีขั้นตอนเท่ากันคือ 15 ขั้นตอน และสามารถลดเวลาประกอบลงคิดเป็นร้อยละ 28.70

6. เอกสารอ้างอิง

[1] วันชัย ริจิรวนิช, 2548. การศึกษาการทำงานหลักการและกรณีศึกษา. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.

[2] วัชรินทร์ สิทธิเจริญ, 2547. การศึกษางาน. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพมหานคร.

[3] กิตติ อินทรานนท์, 2548. การยศาสตร์, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

[4] ยุทธณรงค์ จงจันทร์, ยอดนภา เกตุเมือง และ นราบุริพันธ์. 2555. การจัดสมดุลสายการผลิตเพื่อลดสิ่งสูญเปล่าในกระบวนการผลิตติดตั้งดั้มพ์. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, เพชรบุรี, ประเทศไทย, 17-19 ตุลาคม 2555, หน้า 281-288.

[5] วรรณภัสร์ พูลสุวรรณ. การปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการลดสิ่งสูญเปล่า กรณีศึกษา : การผลิตผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมสำหรับบ้าน. 2553. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[6] นิสากร มรกตเขียว. การปรับปรุงสายการผลิตแผงประตูภายในรถยนต์. 2553. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

การประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยระบบคัมบังสำหรับระบบการป้อนวัตถุดิบของโรงงานอิเล็กทรอนิกส์โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

Application of Kanban Control System for Material Feeding System in Electronics Industry by Computer Simulation

บุษบา พฤกษาพันธุ์รัตน์ *[1)] และ นพพล ศรศิลป์[2)]

Busaba Phruksaphanrat*[1)] and Nopphon Sornsin[2)]

[1), 2)] หน่วยวิจัยเฉพาะทาง ISO-RU ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

* Corresponding author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปัญหาและแก้ปัญหาของระบบการป้อนวัตถุดิบของโรงงานกรณีศึกษาซึ่งเป็นโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์ โดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมุ่งเน้นที่จะลดปริมาณวัตถุดิบที่รอการผลิต เนื่องจากการป้อนวัตถุดิบปัจจุบันไม่สอดคล้องกับการผลิตจริง ส่งผลให้มีปริมาณวัตถุดิบรอหน้าสายการผลิตเป็นปริมาณมากและเกิดการกองสินค้า ในการศึกษานี้จะเน้นพิจารณาในส่วนที่เป็นพื้นที่ห้องสะอาด (Clean room) ด้วยผลิตภัณฑ์หลัก 2 ชนิด ซึ่งมีจำนวนสายการผลิตทั้งหมดจำนวน 27 สายการผลิต การจำลองสถานการณ์ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และเสนอแนวทางการปรับปรุง โดยการปรับปรุงระบบการป้อนได้นำหลักการของคัมบังมาออกแบบระบบการป้อนใหม่ ซึ่งจากการปรับปรุงพบว่าระบบการป้อนใหม่สามารถลดปริมาณวัสดุคงคลังสำหรับสายการผลิตชนิด A ได้ร้อยละ 63 และสายการผลิตชนิด B ได้ร้อยละ 66 อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราการใช้ประโยชน์ของพนักงานได้เฉลี่ยร้อยละ 62.28 เมื่อนำไปใช้ในระบบจริงพบว่าได้ผลใกล้เคียงกับที่ได้ทำการจำลองสถานการณ์

คำสำคัญ : คัมบัง ระบบการป้อนวัตถุดิบ การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

Abstract

This research is an analysis and solving of material feeding system problem of the case study factory, which is a hard drive factory by using computer simulation. The purpose of the study is to reduce the quantity of raw materials, waiting for processing. Currently, material feeding does not correspond to the actual production. So, large amount of raw materials is waiting in front of the production lines. In this study, we focus on Clean room area, with two major product types that have 27 production lines. Computer simulation is used to analyze and propose the improvement method. Feeding system is improved by Kanban concept. The result of the new material feeding system has shown that the quantity of materials in front of the production line of product type A can be reduced 63% and the production line of product type B can be reduced 66%. Utilization of workers has also increased 62.28%. After implementation to the real production lines we have found that the result is similar to the result from the simulation.

Keywords : Kanban, Material feeding system, Computer simulation, Electronics industry.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญต่อการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศไทยแต่ภายใต้สภาวะการแข่งขันที่เริ่มมีความรุนแรงมากขึ้นทั้งตลาดในประเทศและต่างประเทศ จากการเปิดเสรีทางการค้า การรวมกลุ่มจัดตั้งเขตการค้าเสรีต่างๆ และการที่จีนเริ่มมีบทบาทมากขึ้นในตลาดโลก ส่งผลให้ผู้ผลิตไทยจะต้องปรับตัว โดยจะต้องเพิ่มความสามารถ ประสิทธิภาพและยกระดับเทคโนโลยีเพื่อลดต้นทุนการผลิต บริษัทผู้ผลิตจึงต่างมีนโยบายที่จะลดต้นทุนการผลิตลง มุ่งเน้นให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และต้องการใช้วัตถุดิบในการผลิตอย่างพอดี (Just in Time) เพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการ ซึ่งการผลิตแบบพอเหมาะเป็นสิ่งที่ผู้ผลิตต้องการให้เกิดขึ้นในระบบมากที่สุด เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

สำหรับโรงงานกรณีศึกษาซึ่งเป็นโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์ปัจจุบันประสบปัญหาในเรื่องของปริมาณวัตถุดิบหน้าสายการผลิตที่มีปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้กระบวนติดขัดไม่ไหลลื่นเนื่องจากต้องเสียเวลาในการค้นหาวัตถุดิบหน้าสายการผลิตที่จะต้องนำเข้าสู่กระบวนการ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเข็นชนวัตถุดิบที่กองซึ่งมีมูลค่าสูง มีการขนวัตถุดิบกลับเนื่องจากไม่มีที่วางวัตถุดิบ เส้นทางสัญจรภายในโรงงานติดขัด ส่งผลกระทบต่อการไหลโดยรวมของทั้งระบบและเกิดชิ้นงานรอที่ไม่ได้มีการเพิ่มมูลค่าเป็นเวลานาน ทั้งนี้เนื่องจากระบบการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิตในปัจจุบันไม่สอดคล้องกับการผลิตจริง โดยมีการส่งวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิตด้วยเวลาคงที่ แต่ในกระบวนการผลิตจริงมีความผันผวนเนื่องจากความไม่แน่นอนของระบบ จึงทำให้การใช้วัตถุดิบไม่เป็นไปตามอัตราที่คงที่ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ปัญหา เพื่อลดปริมาณวัตถุดิบหน้าสายการผลิต โดยทางโรงงานได้กำหนดการแก้ปัญหางานกองให้เป็นปัญหาเร่งด่วนในการดำเนินการ เนื่องจากมีต้องการลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งจากเวลาที่สูญเปล่า และจากวัตถุดิบนำเข้าที่เสียหาย

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่า ระบบคัมบัง (Kanban system) ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีปริมาณงานระหว่างกระบวนการมาก โดยระบบคัมบังสามารถแก้ปัญหาปริมาณงานระหว่างกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1-5] นอกจากนี้ยังได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบโซ่อุปทาน (Supply chain) และระบบความรู้ (Knowledge) อีกด้วย [6-7] โดยระบบคัมบังมักจะใช้หลักการผลิตแบบดึง [8-9] ระบบคัมบังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบการป้อนวัตถุดิบได้เช่นกัน เพื่อให้ตอบโจทย์บริษัทผู้ผลิต งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบคัมบัง เพื่อจัดการวัตถุดิบหน้าสายการผลิตให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

การประยุกต์ใช้หลักการควบคุมการผลิตแบบคัมบังให้เข้ากับระบบการผลิตจริงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากเดิมโรงงาน ใช้ระบบการผลิตแบบผลัก ต้องเปลี่ยนแปลงมาเป็นระบบการผลิตแบบดึงจะต้องมีการปรับปรุงในส่วนต่างๆ มากมาย ส่งผลให้เกิดการหยุดชะงักในระบบการผลิต และเป็นการเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาในการปรับปรุงระบบ ดังนั้นเทคนิคการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ [10, 11] จึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการสนับสนุนการตัดสินใจของบริษัทผู้ผลิตในการปรับปรุงระบบการผลิตตามแนวทางระบบการผลิตแบบดึง การจำลองสถานการณ์ถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบก่อนและหลังการปรับปรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [12,13] จากงานวิจัยของ Siraprapha D. ในปี 2010 และ R.D. Smet and L.Gelders ในปี 1998 [9, 14] ได้เสนอการจำลองสถานการณ์ที่มีการประยุกต์ใช้กับระบบคัมบังในการควบคุมการผลิต เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้งานกับระบบ เช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำการจำลองสถานการณ์มาใช้ในการวิเคราะห์ระบบการป้อนวัตถุดิบและทดลองการประยุกต์ใช้ระบบคัมบังกับระบบการป้อนวัตถุดิบของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อหาขนาดคัมบังที่เหมาะสม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบคัมบัง

ระบบคัมบัง (Kanban system) เป็นตัวกำหนดปริมาณการผลิต หรือปริมาณในการขนย้ายในทุกๆ กระบวนการ ประโยชน์เบื้องต้นก็คือ การลดการผลิตมากเกินไป (Over-production) และมุ่งหมายเพื่อผลิตสิ่งที่สั่ง ในเวลาที่สั่ง และตามจำนวนที่สั่งเท่านั้น [15] เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์คือ การลดต้นทุนพยายามที่จะให้ของดีมีทั้งหมดและเพื่อการรองรับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การควบคุมคุณภาพและการหาวิธีการที่ทำให้คนทำงานเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ขนาดของคัมบัง กำหนดได้จากปริมาณของจุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder point) [16] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$R = \overline{d}L \quad (1)$$

เมื่อ R คือ จุดสั่งซื้อใหม่

$\overline{d}$ คือ ค่าความต้องการวัตถุดิบเฉลี่ย

L คือ ช่วงเวลานำ

และจะต้องคำนวณหาสต๊อกปลอดภัย (Safety stock) ของวัตถุดิบที่ชั้นวางหน้าสายการผลิตซึ่งใช้อัตราความต้องการสินค้าคงคลังที่แปรผันและรอบเวลาคงที่เป็นสภาวะที่เผื่อวัตถุดิบขาดมือ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$SS = Z\sqrt{L\delta_d} \quad (2)$$

SS คือ สต๊อกปลอดภัย

Z คือ ค่าระดับความเชื่อมั่นว่าจะมีสินค้าเพียงพอต่อความต้องการ

δ_d คือ ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราความต้องการสินค้า

L คือ ช่วงเวลานำ

2.2 การจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ (Simulation) เป็นการรวบรวมวิธีการต่างๆที่ใช้จำลองสถานการณ์จริงหรือพฤติกรรมของระบบต่างๆ มาไว้บนคอมพิวเตอร์โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Software) เข้ามาช่วย เพื่อที่จะศึกษาการไหลของกิจกรรมในรูปแบบต่างๆ โดยมีการเก็บข้อมูล และทำการวิเคราะห์หารูปแบบที่ถูกต้องจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อปรับปรุงในอนาคต [17] เนื่องจากในการปฏิบัติงานจริงไม่สามารถที่จะทำการทดลองหรือปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงานได้ ดังนั้นการจำลองสถานการณ์ (Simulation) จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์สภาพที่เป็นอยู่ในปัจจุบันของระบบ และช่วยหาแนวทางหรือทางเลือก (Scenario) ที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้กับสถานการณ์หรือการปฏิบัติงานจริง ซึ่งจะช่วยให้ลดความเสี่ยงในการเกิดความผิดพลาด หรือความล้มเหลวได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้ประหยัดทั้งค่าใช้จ่าย และเวลาได้อีกทางด้วย (18) ขั้นตอนในการดำเนินการคือ

1) ศึกษาปัญหา
2) สร้างโมเดล
3) เก็บรวบรวมข้อมูล
4) สร้างตัวแปร
5) พิสูจน์โมเดล
6) พิสูจน์ผลว่าสามารถใช้ได้หรือไม่
7) ออกแบบการทดลอง
8) ทำการประมวลผล
9) วิเคราะห์ผล
10) แปลงและแสดงผลรายงาน
11) ดำเนินการปรับปรุงระบบจริง

3. การวิเคราะห์ระบบในปัจจุบัน

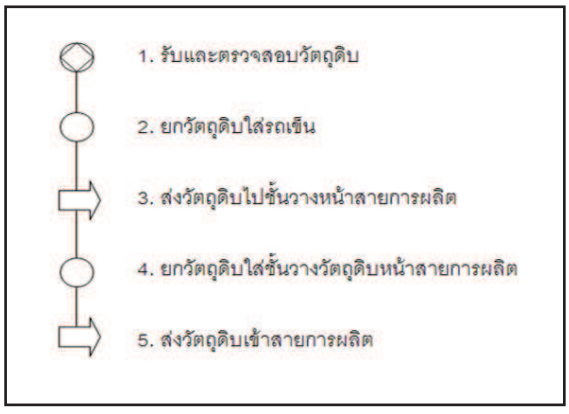
ในการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ปัญหากระบวนการป้อนวัตถุดิบเข้าสายการผลิตผ่านการจำลองสถานการณ์ ที่พบปัญหาการกองวัตถุดิบหน้าสายการผลิตเป็นจำนวนมาก

3.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของระบบ

กระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบด้วย

1. รับวัตถุดิบ (Receiving Area)
2. จัดเตรียมวัตถุดิบ (Kitting Area)
3. สายการผลิต (Assembly Line)
4. เขียนสัญญาณ (Servo Seeder)
5. การทดสอบรอยรั่วของฮาร์ทดิสก์ไดร์ฟ (Auto Seal & Leak Test)

การดำเนินการวิจัยนี้เน้นการศึกษากระบวนการป้อนวัตถุดิบ ครอบคลุมขั้นตอนการป้อนวัตถุดิบจากส่วนรับวัตถุดิบ (Kitting area) จนถึงกระบวนการผลิต (Assembly



รูปที่ 1 แผนผังแสดงกระบวนการกระจายวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิต

line) ซึ่งมีปัญหาการกองวัตถุดิบหน้าสายการผลิตเป็นจำนวนมาก โดยกระบวนการในการกระจายวัตถุดิบเข้าสู่สายการผลิตแสดงดังรูปที่ 1

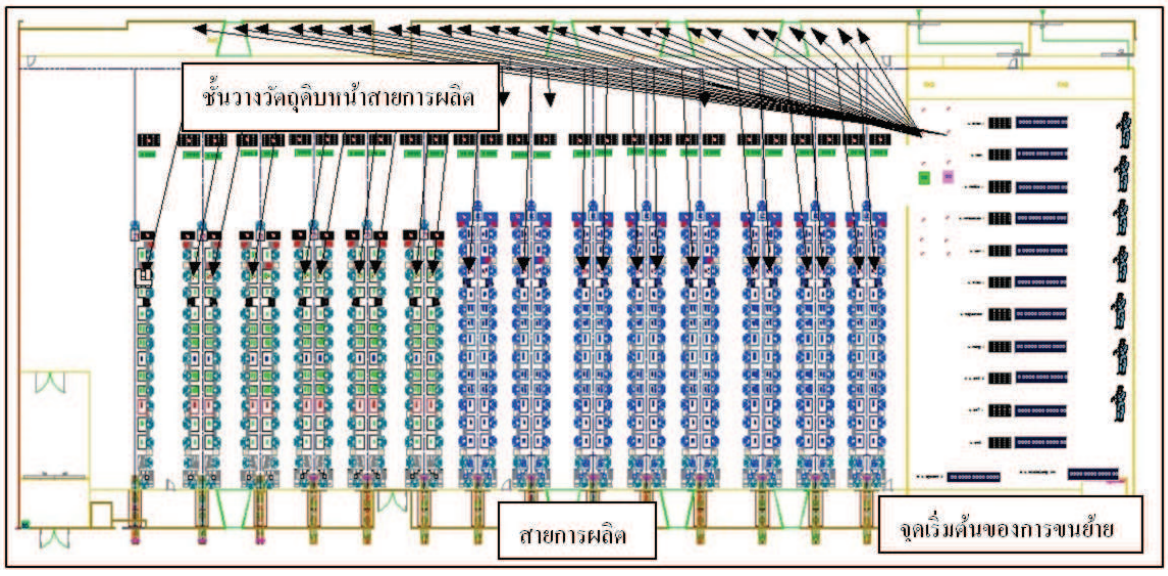
ผลิตภัณฑ์ที่พิจารณาในการผลิตมี 2 ประเภทคือ A และ B การผลิตผลิตภัณฑ์ A จะต้องใช้ชิ้นส่วนทั้งหมด 8 ประเภทคือ BVCM, MBA, Media, Disk Clamp, HSA, TVCM, Top Cover, Ramp การผลิตผลิตภัณฑ์ B จะต้องใช้ชิ้นส่วนทั้งหมด 10 ประเภทคือ BVCM, MBA, Media, Disk Clamp, HSA, TVCM, Top Cover, Ramp, Spacer, Anti Disk โดยแต่ละประเภทในหนึ่งรอบการทำงานจะมีปริมาณการใช้ชิ้นส่วนชนิดละ 1 ชิ้น ยกเว้นสายการผลิตชนิด B ที่จะต้องใช้ Media 2 ชิ้น ชิ้นส่วนอื่นๆ อย่างละ 1 ชิ้นจำนวนสายการผลิตทั้งหมดมีจำนวน 27 สายการผลิต

3.2 การวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้น

โรงงานกรณีศึกษาได้มีการวางวัตถุดิบบนชั้นหน้าสายการผลิตแต่ละสาย โดยมีพื้นที่และมาตรฐานในการวาง

ตารางที่ 1 ปริมาณวัตถุดิบแต่ละชนิดหน้าสายการผลิต A ณ เวลาใดๆ

ชนิดของวัตถุดิบ	ช่วงเวลา											
	7-8 am	8-9 am	9-10 am	10-11 am	11-12 pm	12-1 pm	1-2 pm	2-3 pm	3-4 pm	4-5 pm	5-6 pm	6-7 pm
BVCM	105	119	182	145	190	167	134	198	156	109	178	192
MBA	140	132	152	121	140	117	104	104	119	125	108	140
Media	105	112	105	121	116	118	110	109	107	114	115	105
Disk clamp	360	308	282	264	318	337	324	309	339	345	328	360
HSA	227	287	243	243	261	217	239	261	267	231	245	233
TVCM	300	248	222	204	258	277	264	249	279	285	268	300
Top Cover	96	44	87	89	91	73	60	76	84	81	94	96
Ramp	308	282	264	318	337	308	282	264	318	337	277	264
รวม	1641	1532	1537	1505	1711	1614	1517	1570	1669	1627	1613	1690
ค่ามาตรฐาน	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400



รูปที่ 2 แบบจำลองสถานการณ์ของสายการผลิต

วัตถุดิบที่ทางโรงงานกำหนดไว้เพื่อป้องกันไม่ให้พนักงานวางวัตถุดิบในปริมาณที่มากเกินกว่าที่ชั้นวางสามารถรองรับได้ และเพียงพอต่อความต้องการในสายการผลิตโดยจะมีการป้อนวัตถุดิบมาเติมที่ชั้นวางด้วยเวลาที่คงที่ทุกๆ 20 นาที ส่งผลให้เกิดปริมาณวัตถุดิบคงเหลือหน้าสายการผลิตปริมาณมากเกินความต้องการ ซึ่งในบางครั้งมีปริมาณวัตถุดิบมากเกินกว่าพื้นที่ของชั้นวาง ดังตัวอย่างปริมาณวัตถุดิบหน้าสายการผลิตชนิด A แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยวัตถุดิบ

ตารางที่ 2 รายละเอียดของงานและข้อมูลเวลาการทำงาน

ลำดับงานที่	ชื่องาน	เวลาทำงานเฉลี่ย (วินาที)	ลักษณะการแจกแจง	พารามิเตอร์
1	ยกวัตถุดิบใส่รถเข็น	144.44	Power function	B(2.66, 1.,114, 116)
2	ยกวัตถุดิบใส่ชั้นวางวัตถุดิบ	132.82	Triangular	T(105, 107, 107)
3	สายการผลิตชนิด A1	11.62	Lognormal	10.+L(1.72, 1.55)
4	สายการผลิตชนิด A2	11.66	LogLogistic	10.+1.47*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./3.54)
5	สายการผลิตชนิด A3	12.04	Weibull	10.+W(2.35, 2.29)
6	สายการผลิตชนิด A4	11.37	LogLogistic	9.+2.18*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./5.17)
7	สายการผลิตชนิด A5	12.02	LogLogistic	10.+1.77*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./2.87)
8	สายการผลิตชนิด A6	11.87	Lognormal	10.+L(1.9, 1.29)
9	สายการผลิตชนิด A7	11.75	LogLogistic	10.+1.56*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./3.38)
10	สายการผลิตชนิด A8	11.43	Pearson	10.+P5(3.13, 3.12)
11	สายการผลิตชนิด A9	11.51	Pearson	10.+P5(4.19, 4.91)
12	สายการผลิตชนิด A10	11.89	Pearson	10.+P6(2.88, 3.99e+003, 2.62e+003)
13	สายการผลิตชนิด A11	11.47	Pearson	9.+P5(6.35, 13.3)
14	สายการผลิตชนิด A12	11.71	Pearson	10.+P5(2.82, 3.29)
15	สายการผลิตชนิด A13	11.53	LogLogistic	10.+1.3*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./2.65)
16	สายการผลิตชนิด A14	11.02	Weibull	9.+W(3.25, 2.25)
17	สายการผลิตชนิด A15	10.80	Inverse Gavssion	9.+IG(7.36, 1.8)
18	สายการผลิตชนิด A16	12.11	Weibull	10.+W(2.45, 2.38)
19	สายการผลิตชนิด B1	14.69	Weibull	12.+W(2.37, 3.04)
20	สายการผลิตชนิด B2	14.74	Weibull	12.+W(3.28, 3.03)
21	สายการผลิตชนิด B3	15.17	Power function	B(2.05, 1.73, 13., 16.9)
22	สายการผลิตชนิด B4	15.59	Pearson	13.+P6(6.94, 113, 43.3)
23	สายการผลิตชนิด B5	14.98	Pearson	13.+P6(5.57, 26.5, 9.05)
24	สายการผลิตชนิด B6	15.31	Weibull	12.+W(3.37, 3.68)
25	สายการผลิตชนิด B7	15.11	Weibull	12.+W(3.37, 3.45)
26	สายการผลิตชนิด B8	15.15	LogLogistic	12.+3.09*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./6.04)
27	สายการผลิตชนิด B9	15.62	Weibull	13.+W(2., 2.96)
28	สายการผลิตชนิด B10	15.25	Weibull	13.+W(2., 2.56)
29	สายการผลิตชนิด B11	15.16	Weibull	12.+W(4.3, 3.43)

ที่มากกว่ามาตรฐานจะต้องถูกขนกลับ

3.3 การจำลองสถานการณ์ของระบบในปัจจุบัน

การจำลองสถานการณ์ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณวัตถุดิบของกระบวนการผลิตปัจจุบันและกระบวนการผลิตหลังปรับปรุง โดยผังกระบวนการป้อนวัตถุดิบจากแบบจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 2 ในการจำลองสถานการณ์ได้กำหนดให้พนักงานประเภทเดียวกันมีความสามารถเท่ากัน ไม่เกิดของเสียในการผลิต และไม่เกิดปัญหาเครื่องจักรขัดข้องขึ้น

ข้อมูลที่นำมาใช้ได้มีการหาเวลามาตรฐานการทำงาน วิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูล (Test of independence) จาก Scatter diagram และ Run test โดยดูจากการกระจายตัวของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวอย่างอิสระไม่มีทิศทางไปในทางใดทางหนึ่ง ทดสอบความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของข้อมูล (Test of homogeneity) โดยดูจาก Histogram ของข้อมูลว่าข้อมูลเป็นกลุ่มเดียวกันหรือไม่ ไม่แยกจากกัน และหาการกระจายที่เหมาะสมโดยวิเคราะห์ Goodness of fit ด้วยวิธี Kolmogorov-Simonov [19] ได้ผลการวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2

นอกจากนั้นยังได้ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยทดลองจำลองผลการผลิตที่จำนวนชั่วโมงที่แตกต่างกัน และดูปริมาณที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยค่าเฉลี่ย พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5% ในทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์

จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง (s) ของสายการผลิต A ที่ 3.03 และ ของสายการผลิต B ที่ 2.38 สามารถคำนวณค่า Half-Width (*hw*) จากการกำหนดจำนวนรอบในการจำลองสถานการณ์ (*n*) 30 รอบได้ตามสมการต่อไปนี้ [19]

$$hw = \frac{\left(t_{(29,1-\alpha/2)}\right)s}{\sqrt{n}} \qquad (3)$$

เมื่อ $t_{((29,1-\alpha/2))} = 2.045$ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ สายการผลิตชนิด A จะได้

$$hw = \frac{(2.045)3.03}{\sqrt{30}} = 1.13$$

สายการผลิตชนิด B จะได้

$$hw = \frac{(2.045)2.36}{\sqrt{30}} = 0.88$$

และสามารถคำนวณหาจำนวนรอบในการจำลองสถานการณ์ได้จากสูตรต่อไปนี้ [19]

$$n' = \left[\frac{\left(t_{(29,1-\alpha/2)}\right)s}{hw}\right]^2 \qquad (4)$$

สายการผลิตชนิด A จะได้

$$n' = \left[\frac{(2.045)3.03}{1.13}\right]^2 = 30$$

สายการผลิตชนิด B จะได้

$$n' = \left[\frac{(2.045)2.36}{0.98}\right]^2 = 30$$

รอบสำหรับทั้งสายการผลิต A และ B แต่ในการทดลองจริงใช้การจำลอง 30 รอบ

จำนวนการผลิตจริงเฉลี่ยในเดือนมกราคม มีค่าเท่ากับ 3,929 ชิ้นต่อ 12 ชั่วโมง สำหรับสายการผลิตชนิด A และ 2,883 ชิ้นต่อ 12 ชั่วโมงสำหรับสายการผลิตชนิด B ค่าเฉลี่ยจำนวนการผลิตจากการจำลองสถานการณ์ ($\bar{y}$) ของสายการผลิตชนิด A และ B มีค่า 3,939.5 และ 2,883.5 ตามลำดับ เมื่อทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยประชากรชุดเดียวในกรณีไม่ทราบค่าความแปรปรวน ด้วย t-test ได้คือ

สมมติฐานของสายการผลิตชนิด A

$H_0: \mu_0 = 3,929$

$H_1: \mu_0 \neq 3,929$

สายการผลิตชนิด A;

$$t_0 = \frac{\bar{y} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

$$t_0 = \frac{3,939.5 - 3,929}{3.03/\sqrt{30}} = 0.903$$

ตารางที่ 3 ปริมาณงานค้างของแบบจำลองปัจจุบัน

แบบจำลอง	ผลรวมของจำนวนวัตถุดิบระหว่างกระบวนการกระจายวัตถุดิบสะสมเฉลี่ย(ชิ้นต่อ 12 ชม.)		เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของพนักงานเฉลี่ย
	สายการผลิตชนิด A	สายการผลิตชนิด B	
ปัจจุบัน	2,115	4,255	47.70%

สมมติฐาน ของสายการผลิตชนิด B

$H_0: \mu_0 = 2,883$

$H_1: \mu_0 \neq 2,883$

สายการผลิตชนิด B;

$$t_0 = \frac{2,883.5 - 2,883}{2.36/\sqrt{30}} = 1.16$$

จาก $-t_{crit} < t_0 < t_{crit}$

หรือ -2.045 < 0.903 < 2.045 สำหรับสายการผลิต A

หรือ -2.045 < 1.16 < 2.045 สำหรับสายการผลิต B

ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ในหนึ่งวันจากแบบจำลองสถานการณ์นั้นไม่แตกต่างกับค่าเฉลี่ยของจำนวนที่ผลิตได้ในหนึ่งวันของการผลิตจริง แสดงว่าสามารถใช้ผลของการจำลองสถานการณ์แทนผลของสายการผลิตจริงได้

เมื่อทำการจำลองระบบได้ผลของอัตราอรรถประโยชน์ของการใช้พนักงานเฉลี่ยมีค่าเป็นร้อยละ 47.70 ซึ่งอยู่ในระดับต่ำ และมีปริมาณงานกองหน้าสายการผลิตอยู่มาก แสดงในตารางที่ 3 อีกทั้งยังมีการขนชิ้นงานกลับไปคลังสินค้าเฉลี่ยต่อวันต่อสายการผลิตคิดเป็น 34% และ 51% ของมาตรฐานชั้นวางชิ้นงานสำหรับสายการผลิต A และ B ตามลำดับ

4. การประยุกต์ใช้ระบบคัมบังเพื่อแก้ปัญหา

จากการจำลองสถานการณ์สายการผลิตโดยใช้หลักการของคัมบังเพื่อกำหนดปริมาณวัตถุดิบที่จะขนไปป้อนหน้ากระบวนการผลิต คำนวณจากจุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder

ตารางที่ 4 ช่วงเวลานำและขนาดถาดบรรจุวัตถุดิบแต่ละชนิด

ชนิดวัตถุดิบ	ขนาดคัมบัง			
	สายการผลิตชนิด A		สายการผลิตชนิด B	
	ช่วงเวลานำ (ชม.)	ขนาดถาดบรรจุวัตถุดิบ	ช่วงเวลานำ (ชม.)	ขนาดถาดบรรจุวัตถุดิบ
BVCM	0.198	15	0.266	15
MBA	0.198	10	0.266	10
Media	0.198	25	0.266	25
Anti Disk	0.198	-	0.266	24
Disk Clamp	0.198	18	0.266	18
Spacer	0.198	-	0.266	28
HSA	0.198	8	0.266	8
TVCM	0.198	15	0.266	15
Top Cover	0.198	12	0.266	12
Ramp	0.198	168	0.266	168

point) รวมถึงการสต๊อกปลอดภัยเพื่อป้องกันวัตถุดิบขาดมือ ดังสมการ (1)-(2) หลังจากนั้นพิจารณาขนาดของถาดบรรจุเพื่อกำหนดขนาดคัมบังที่ต้องใช้

ค่าอัตราความต้องการวัตถุดิบเฉลี่ยของชิ้นส่วนแต่ละรายการของสายการผลิต A คือ 327 ชิ้นต่อชั่วโมง โดยมีค่าเบี่ยงเบนของอัตราความต้องการวัตถุดิบ 13.327 ชิ้น ส่วนค่าอัตราความต้องการวัตถุดิบเฉลี่ยของชิ้นส่วนแต่ละรายการของสายการผลิต B คือ 240 ชิ้นต่อชั่วโมง โดยมีค่าเบี่ยงเบนของอัตราความต้องการวัตถุดิบ 12.57 ชิ้น ยกเว้น Media มีค่าอัตราความต้องการวัตถุดิบเฉลี่ยของชิ้นส่วนแต่ละรายการของสายการผลิต B คือ 480 ชิ้นต่อชั่วโมง โดยมีค่าเบี่ยงเบนของอัตราความต้องการวัตถุดิบ 12.57 ชิ้น ช่วงเวลานำของวัตถุดิบและขนาดของถาดบรรจุชิ้นส่วนแต่ละชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 4 หลังจากนั้นพิจารณาขนาดของคัมบังหรือจุดสั่งซื้อใหม่เพิ่มด้วย สต๊อกปลอดภัยและพิจารณาขนาดภาชนะบรรจุ สำหรับวัตถุดิบแต่ละชนิดคำนวณได้ค่าดังตารางที่ 5 โดยมีตัวอย่างการคำนวณขนาดคัมบังของ BVCM ดังต่อไปนี้

ชั้นวางหน้าสายการผลิตสุดท้ายแบบชนิด A มีการใช้เวลาจากการยกวัตถุดิบใส่รถเข็น เดินจากห้องเก็บวัตถุดิบมายังชั้นวางหน้าสายการผลิต และยกวัตถุดิบใส่ชั้นวางวัตถุดิบหน้าสายการผลิต รวมเป็นเวลา 0.198 ชั่วโมง

ตารางที่ 5 ขนาดคัมบังที่ใช้

ชนิดวัตถุดิบ	ขนาดคัมบัง	
	สายการผลิตชนิด A	สายการผลิตชนิด B
BVCM	75	75
MBA	80	80
Media	75	150
Anti Disk	-	96
Disk Clamp	90	90
Spacer	-	84
HSA	80	80
TVCM	75	75
Top Cover	84	84
Ramp	168	168

$R = \bar{d} \times L$

$R = 327 \times 0.198$

$R = 64.74 \sim 65$ ชิ้น

ระดับการให้บริการประมาณร้อยละ 95

$$SS = Z\sqrt{L\delta_d}$$

$SS = 1.645 \times 0.4449 \times 12.513$

ตารางที่ 6 ปริมาณงานค้างของแบบจำลองระบบคัมบัง

แบบจำลอง	จำนวนวัตถุดิบสะสมเฉลี่ย (ชิ้นต่อ 12 ชม.)		เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของพนักงานเฉลี่ย
	สายการผลิตชนิด A	สายการผลิตชนิด B	
ระบบคัมบัง	792	1,466	77.41%

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง

แบบจำลอง	จำนวนวัตถุดิบสะสมเฉลี่ย (ชิ้นต่อ 12 ชม.)		เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของพนักงานเฉลี่ย
	สายการผลิตชนิด A	สายการผลิตชนิด B	
ปัจจุบัน	2,115	4,255	47.70%
ระบบคัมบัง	792	1,466	77.41%
เปอร์เซ็นต์การปรับปรุง	63%	66%	62.28%

SS = 9.16 ~ 10 ชิ้น

ดังนั้น จุดสั่งซื้อใหม่รวมถึงการสต๊อกปลอดภัยของวัตถุดิบแต่ละชนิดของสายการผลิตชนิด A เท่ากับ 75 ชิ้น

เมื่อจำลองสถานการณ์ของระบบการป้อนแบบคัมบังนี้จะทำให้ได้ปริมาณวัตถุดิบหน้าสายการผลิตที่มีปริมาณลดลง และมีอรรถประโยชน์ของพนักงานที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 77.41 แสดงได้ดังตารางที่ 6 จากการประยุกต์ใช้ระบบคัมบังมาควบคุมการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิตพบว่า สามารถลดปริมาณวัตถุดิบกองหน้าสายการผลิต A และ B ได้ 63% และ 66% ตามลำดับ โดยไม่ทำให้กระบวนการหยุดชะงักและทำให้เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของพนักงานเพิ่มขึ้น 62.88% อีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 7

เมื่อนำขนาดคัมบังที่ได้จากการคำนวณและประมวลผลด้วยการจำลองสถานการณ์ไปประยุกต์ใช้ในการผลิตจริง โดยเมื่อเริ่มผลิตก็จะมีการขนย้ายวัตถุดิบเข้าสายการผลิตทันทีและมีการขนอย่างต่อเนื่อง ด้วยปริมาณเท่ากับขนาดคัมบังที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5 ซึ่งพบว่าปริมาณวัตถุดิบหน้าสายการผลิต A และ B มีค่าใกล้เคียงกับการจำลองสถานการณ์ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยมีความแตกต่างระหว่างระบบจริงและจากการจำลองเฉลี่ย ไม่เกิน 5% ของทั้งสองสายการผลิตและไม่เกิดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบขึ้น

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำหลักการของระบบการควบคุมแบบคัมบังมาประยุกต์ใช้กับการกระจายวัตถุดิบเข้าสายการผลิตฮาร์ทดิสก์ โดยใช้การจำลองสถานการณ์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และแสดงผล ปัญหาของการกระจายวัตถุดิบในปัจจุบัน พบว่าเกิดการกองวัตถุดิบหน้าสายการผลิตต่างๆ ในปริมาณมาก เนื่องจากการป้อนวัตถุดิบเข้าสายการผลิตในปัจจุบันไม่สอดคล้องกับการผลิต หลักการของคัมบังจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้และพบว่าสามารถลดปริมาณวัตถุดิบที่กองหน้าสายการผลิตแบบ A ได้ร้อยละ 63 และสายการผลิตแบบ B ได้ร้อยละ 66 ทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราการใช้ประโยชน์ของพนักงานเฉลี่ยร้อยละ 62.28 จากการปรับปรุงทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการจัดอัตราการป้อนวัตถุดิบที่เหมาะสมสามารถช่วยลดปริมาณวัตถุดิบที่เกินความต้องการและเพิ่มอรรถประโยชน์ของพนักงานได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการควบคุมวัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพ และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้จริงพบว่าได้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองระบบคัมบังด้วยคอมพิวเตอร์และไม่เกิดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Parnjai J. An application of Kanban system for improving inventory management at a warehouse: case study of automotive part manufacturer [MSc thesis]. Bangkok : King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 2011. (In Thai).

[2] Chan, F.T.S..Effect of Kanban size on Just-In-Time manufacturing systems. Journal of Material Processing Technology. 2001; 116: 146 -160.

[3] Fukukawa, T, S. Hong. The determination of the optimal number of Kanbans in a Just-In-Time Production System. Computers Industrial Engineering. 1993;24(4): 551-559.

[4] Al-Tahat, M.D. and Mukattash A.M. Design and analysis of production control scheme for Kanban-based JIT environment, Journal of the Franklin Institute. 2006; 343: 521-531.

[5] Yang, L. and Zhang X.-P. Design and application of Kanban control system in a multi-stage, mixed model assembly line. Systems Engineering – Theory & Practice. 2009; 29,9: 64-72.

[6] Wang, S. and Sarker B.R. Optimal models for a multi-stage supply chain system controlled by Kanban under just-in-time philosophy. European Journal of Operational Research. 2006; 172: 179-200.

[7] Lin, C.J., Chen F.F. and Chen Y. M. Knowledge Kanban system for virtual research and development. 2013; 29: 119-134.

[8] Kiatkajohn K. Application of hybrid push/pull production system: case study of a diesel engine manufacturing factory [MSc thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2000. (In Thai).

[9] Siraprapha D. Determining the optimal Kanban cards

in conveyor production by using simulation Models [MSc thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2010. (In Thai).

[10] Wilisinee R. Comparison study between push and pull control system and determining the Kanban level in hard disk manufacturing using simulation technique [MSc thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2005. (In Thai).

[11] Sathaporn P. Use of simulation for performances improvement of head gimbals assembly line [MSc thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2000. (In Thai).

[12] Savsar, M. Simulation analysis of a pull-push system for an electronic assembly line. International Journal Production Economics.1997; 51: 205 – 214.

[13] Savsar, M, A. Al-Jawini.Simulation Analysis of Just-In-Time production systems. International Journal Production Economics. 1995; 42: 67 -78.

[14] Smet, R. D. and Gelders L. Using simulation to evaluate the introduction of a Kanban subsystem within an MRP-controlled manufacturing environment. International Journal of Production Economics. 1998; 56-57l: 111-122.

[15] Boonserm W, The productivity Press Development Team. Kanban for Shopfloor. Bangkok : E.I. Square Publishing Co ; 2006.

[16] Pipob L. Capacity Planning and Control. Bangkok : SE-EDUCATION; 2013.

[17] Kelton D.W., Sadowski R.P., Sturrock D.T.. Simulation with Arena. 3rd ed. International Edition McGraw-Hill: The McGraw-Hill Company Inc; 2003.

[18] Maria, A. Introduction to model and simulation. Proceeding of the 1997 Winter simulation Conference ed. S. Andradottir, K.J. Healy, D.H. Withers, and B.L.Nelson; 1997.

[19] Harrell C, Ghosh BK, Bowden RO. Simulation using Promodel. 2nd ed. McGraw-Hill: Singapore; 2003.

การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันน้ำในดินเหนียว

Stability Analysis of Cantilever Flood Walls in Clayr

สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ และ บุญชัย อุกฤษฏชน*

Suraparb Keawsawasvong and Boonchai Ukritchon*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

* Corresponding author : boonchai.uk@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเสถียรภาพแบบไม่ระบายน้ำของกำแพงยื่นกันน้ำในดินเหนียว วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบระนาบความเครียด 2 มิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหานี้ กำแพงยื่นมีระยะฝังในดิน, L, ต้านแรงดันด้านข้างจากความสูงของระดับน้ำ, H สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ ดินเหนียวถูกจำลองเป็นอิลิเมนต์แบบของแข็งที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบมอร์-คูลอมบ์ในสภาพไม่ระบายน้ำ กำแพงถูกจำลองเป็นอิลิเมนต์แบบแผ่นที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบอิลาสติก ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความลึกระหว่างผิวสัมผัสของดินเหนียวและกำแพง โดยกำหนดให้เป็นผิวสัมผัสแบบหยาบและไม่เกิดแรงดึง การวิบัติของกำแพงกันน้ำถูกจำลองในการวิเคราะห์ไฟไนอิลิเมนต์ด้วยวิธีลดทอนกำลัง ผลที่ได้นำเสนอในรูปของตัวเลขเสถียรภาพ, $FS\gamma_w H/(s_{u0}+\rho H)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของอัตราส่วนระยะฝังกำแพง, L/H โดย γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ, s_{u0} = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวที่ผิวดิน, ρ = อัตราการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว นอกเหนือจากนั้น กราฟออกแบบยังรวมถึงแรงเฉือนมากสุดและโมเมนต์มากสุดในกำแพง ท้ายที่สุด สมการผลเฉลยของตัวเลขเสถียรภาพ แรงเฉือนมากสุด และโมเมนต์มากสุดถูกนำเสนอในบทความนี้

คำสำคัญ : ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระนาบความเครียด ไฟไนต์อิลิเมนต์ กำแพงกันน้ำ

Abstract

This paper presents undrained stability of cantilever flood walls in cohesive soils. The two dimensional plane strain finite element is employed to determine stability of this problem. The cantilever wall with the length, L, resists the lateral load loading of water with the height, H. For finite element analyses, the clay is modelled as solid element with the Mohr-Coulomb material in an undrained condition. The wall is modelled as plate element with elastic material. Soil-structure interface are used around the embedded wall with the conditions of fully rough surface and no tension. The failure of the flood wall is simulated in finite element analyses by means of the strength reduction method. The results of analyses are presented in terms of stability number, $FS\gamma_w H/(s_{u0}+\rho H))$ as a function of embedment ratio, L/H, where γ_w = unit weight of water, s_{u0} = mobilized undrained shear strength of the clay at the surface, ρ = rate of linear increase in undrained shear strength. In addition, design charts include maximum shear force and maximum bending moment in the wall. Finally, the expressions of stability number, maximum shear force and maximum bending moment are also proposed in the paper.

1. บทนำ

กำแพงยื่นมีการนำมาใช้เป็นกำแพงกันน้ำทั่วไปในทางปฏิบัติ เช่น ในรัฐนิวออร์ลีนส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ในอดีตที่ผ่านมารัฐนิวออร์ลีนส์ ได้เกิดภัยพิบัติพายุเฮอร์ริเคนแคทรีนา ซึ่งถือได้ว่าเป็นภัยพิบัติที่สร้างความเสียหายเป็นวงกว้างมากที่สุดในประวัติศาสตร์ของสหรัฐอเมริกา [6] , [7] สาเหตุหนึ่งมาจากการพังทลายของกำแพงกันน้ำ ทำให้พื้นที่ต่างๆ กว่า 80% ของนิวออร์ลีนส์ ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลจมอยู่ใต้น้ำโดยบางแห่งมีระดับน้ำสูงถึง 7 เมตร ในประเทศไทย กำแพงยื่นกันน้ำได้มีการนำไปใช้มากขึ้นหลังจากเกิดมหาอุทกภัยในปี พ.ศ. 2554 เพื่อป้องกันโครงการหมู่บ้านจัดสรรหรือโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมต่างๆเป็นจำนวนมาก โดยการปรับปรุงรั้วของโครงการเหล่านี้ให้มีความสูงมากขึ้นเป็นกำแพงยื่นกันน้ำเพื่อป้องกันปัญหาน้ำท่วมที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต เนื่องจากภัยพิบัติในลักษณะดังกล่าวข้างต้น การออกแบบกำแพงกันน้ำที่มีความแข็งแรงเพียงพอจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการป้องกันภัยพิบัติเหล่านี้ โดยการวิเคราะห์และออกแบบกำแพงกันน้ำจำเป็นต้องทราบแฟกเตอร์ความปลอดภัย (FS) ระยะฝังของกำแพง (L) รวมไปถึงแรงเฉือนมากสุด (Vmax) และโมเมนต์มากสุด (Mmax) ที่เกิดขึ้นในกำแพง

1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bea (2008) [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพของกำแพงกั้นน้ำในรัฐนิวออร์ลีนส์ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์ เพื่อหาค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่คลื่นพายุหมุนที่กระทำกับกำแพงในระดับความสูงคลื่นต่างๆ แต่ยังไม่มีการศึกษาผลเฉลยทั่วไปในรูปของตัวแปรไร้มิติ

ต่อมา Yuan and Whittle (2014) [2] ก็ได้ศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพของกำแพงกั้นน้ำในรัฐนิวออร์ลีนส์ไว้เช่นกัน โดยผลเฉลยมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Bea (2008) [1] แตกต่างกันตรงที่ Yuan and Whittle (2014) [2] ใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ด้วยการวิเคราะห์ขอบบน (Upper Bound) และขอบล่าง (Lower Bound) การวิเคราะห์หาค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (FS) ยังแบ่งเป็นสองแบบจำลองคือ แบบจำลองแบบที่มีชั้นดินอ่อน และแบบจำลองที่ไม่มีชั้นดินอ่อน อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาผลเฉลยทั่วไปในรูปของตัวแปรไร้มิติเช่นกัน

Ukritchon (1998) [3] ได้ใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ในการหาแรงวิบัติของกำแพงรับแรงด้านข้างในดินเหนียว (Laterally loaded wall) ด้วยวิธีขอบบน (Upper Bound) และขอบล่าง (Lower Bound) แต่ผลเฉลยไม่สามารถประยุกต์ใช้กับกำแพงกันน้ำได้เพราะไม่ได้คิดผลของหน่วยแรงกดทับ (Surcharge) จากความดันน้ำ

ดังนั้น ผลเฉลยของกำแพงกันน้ำบางส่วนที่มีอยู่เป็นเพียงกรณีศึกษาเท่านั้น เช่น กรณีศึกษาในรัฐนิวออร์ลีนส์ ไม่มีผลเฉลยหรือตารางสำหรับการออกแบบของกำแพงกันน้ำที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ ผลเฉลยเสถียรภาพของกำแพงยื่นที่มีอยู่เป็นกรณีของกำแพงกันดินตามหนังสือวิศวกรรมฐานรากทั่วไป เช่น Bowles (2001) [4] ไม่ใช่ผลเฉลยกำแพงยื่นกันน้ำ การสร้างผลเฉลยจะทำให้การออกแบบรวดเร็วและปลอดภัยยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาผลเฉลยและสร้างตารางสำหรับการออกแบบของกำแพงกันน้ำในตัวแปรไร้มิติรวมไปถึงการหาสมการผลเฉลยของกำแพงกันน้ำซึ่งจะทำให้การออกแบบรวดเร็วและสะดวกขึ้น

2. วิธีการวิเคราะห์

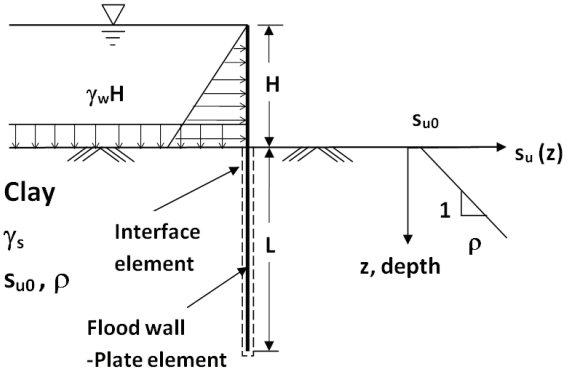
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Finite Element Plaxis 2D (Brinkgreve et al., 2002 [5]) ด้วยวิธีลดทอนกำลัง (Strength reduction method) กำลังรับแรงเฉือนเต็มแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) ถูกลดทอนค่าไปเรื่อยๆด้วยค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (FS) ดังสมการที่ (1) ระบบเกิดการวิบัติและเข้าสู่สภาพวิบัติ (Limit state) ก็ต่อเมื่อแฟตเตอร์ความปลอดภัย (FS) ลู่เข้าสู่ค่าคงที่

$$s_{um} = \frac{s_u}{FS} \qquad (1)$$

โดย s_u = กำลังรับแรงเฉือนเต็มแบบไม่ระบายน้ำ (Full undrained shear strength)

FS = แฟกเตอร์ความปลอดภัย (Factor of safety)

S_{um} = กำลังรับแรงเฉือนลดทอนแบบไม่ระบายน้ำ (Reduced undrained shear strength)



รูปที่ 1 ปัญหากำแพงยื่นกันน้ำ

2.1 แบบจำลองของดินเหนียว

การวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์จำลองให้ดินเหนียวเป็นอิลิเมนต์แบบของแข็งที่เป็นการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวดิน (s_{u0}) อัตราส่วนของป๊วซอง (ν) = 0.495 อัตราส่วนโมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว (E/s_{u0}) = 500 มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 0 มุมขยายตัวเชิงปริมาตร (ψ) = 0 นอกเหนือจากนี้การวิเคราะห์ยังศึกษาถึงอัตราการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว (ρ) ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 แบบจำลองของกำแพง

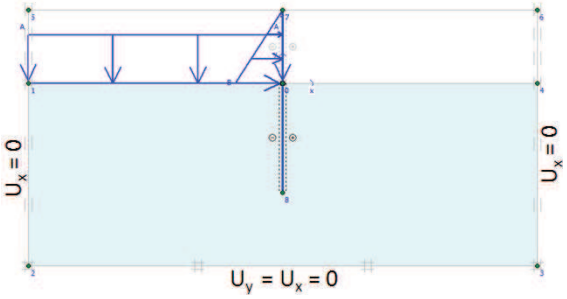
กำแพงจำลองเป็นวัสดุแบบแผ่น (Plate element) มีค่าอัตราส่วนของป๊วซอง (ν) = 0.21 โมดูลัสของยัง (E) = 2.545×10^7 kPa ความลึกของกำแพงที่ฝังในดิน (L) และความสูงของระดับน้ำ (H) ดังแสดงในรูปที่ 1

2.3 ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างกำแพงและดินเหนียว

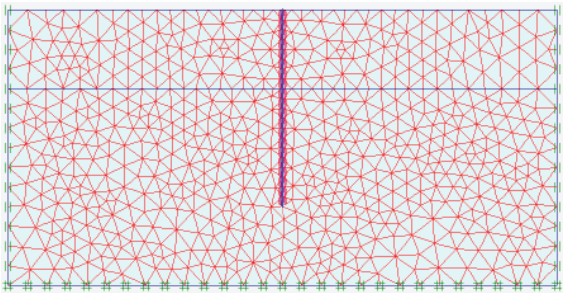
ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความลึกระหว่างผิวสัมผัสของดินเหนียวและกำแพง กำหนดให้เป็นผิวสัมผัสแบบหยาบ(Rough) นั่นคือ $C_i = C_{soil}$, $\phi_i = \phi_{soil}$, $\psi_i = \psi_{soil}$ และเป็นการเชื่อมต่อแบบไม่เกิดแรงดึง (No tension)

2.4 เงื่อนไขการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่ขอบเขต

ขอบล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง ขอบซ้ายและขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ ขอบบนด้านซ้ายมีหน่วยแรงกดทับ (Surcharge, $\gamma_w H$) จากความดันน้ำ ขอบบนด้านขวาเป็นแบบพื้นผิวอิสระ (Free surface) สำหรับส่วนที่ยื่นของกำแพงมีความดันรูปสามเหลี่ยมจากความดันน้ำกระทำ โดยรายละเอียดทั้งหมดแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองกำแพงกันน้ำด้วยโปรแกรม Plaxis



รูปที่ 3 ตัวอย่างโครงข่ายไฟไนต์อิลิเมนต์

2.5 โครงข่ายไฟไนต์อิลิเมนต์

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane strain) ชิ้นส่วนดินเป็นชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 15 จุดต่อ (Node) และความเค้นภายในชิ้นส่วน 12 จุด (Stress points) การแบ่งโครงข่ายออกเป็นชิ้นส่วนย่อยใช้แบบละเอียดสูงสุด (Very fine) ดังที่แสดงในรูปที่ 3

2.6 พารามิเตอร์ที่ศึกษา

พารามิเตอร์ป้อนเข้า (Input normalized parameters) ของการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์มีดังนี้

1. อัตราส่วนระยะฝังกำแพง (L/H) = 0.8 – 2.5
2. อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักของดินที่สภาวะอิ่มตัว(γ_s / γ_w) = 1.4 – 1.8
3. อัตราส่วนแรงเฉือนเพิ่มตามความลึกต่อแรงเฉือนที่ผิวดิน ($\rho H/s_{u0}$) = 0 – 1
4. ส่วนกลับของอัตราส่วนแรงเฉือนเพิ่มตามความลึกต่อแรงเฉือนที่ผิวดิน ($s_{u0}/\rho H$) = 0 – 1

ผลเฉลยที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์มี 3 พจน์ คือ

1. แฟกเตอร์ความปลอดภัย (FS)

2. แรงเฉือนมากสุด (V_{max})

3. โมเมนต์มากสุด (M_{max})

ผลเฉลยแบบตัวแปรไร้มิติของเสถียรภาพกำแพงกันน้ำคือ

1. ตัวเลขเสถียรภาพ (Stability Number), $FS\gamma_w/(s_{u0}+\rho H)$

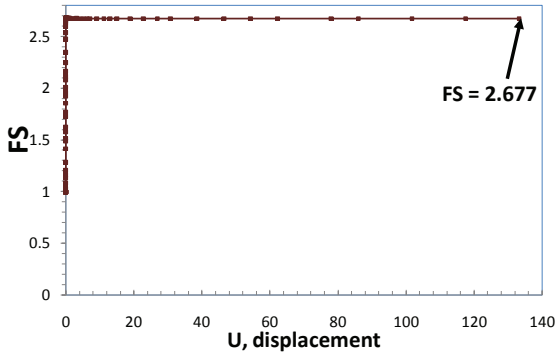
2. อัตราส่วนแรงเฉือนมากสุด (Ratio of maximum shear force), $FSV_{max}/(s_{u0}+\rho H)H$

3. อัตราส่วนโมเมนต์มากสุด (Ratio of maximum bending moment), $FSM_{max}/(s_{u0}+\rho H)H^2$

3. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย โดยวิธีลดทอนกำลัง ระบบเกิดการวิบัติและเข้าสู่สภาพวิบัติ (Limit state) ก็ต่อเมื่อ FS ลู่เข้าสู่ค่าคงที่ ในตัวอย่างนี้ ค่า FS เริ่มจาก 1 และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนลู่เข้าสู่ 2.677 ซึ่งเป็นคำตอบของปัญหา

การตรวจสอบตัวแปรไร้มิติพบว่าเมื่อปัญหากำแพงยื่นกันน้ำพจน์ L/H และ $\rho H/s_{u0}$ มีตัวแปรไร้มิติของผลเฉลยจะมีค่าคงที่เช่นกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่า FS

No	L	H	s_{u0}	γ_w	ρ
1	4	2	10	10	1
2	8	4	30	10	1.5

No	L/H	$\rho H/s_{u0}$	γ_s/γ_w	FS	$FS\gamma_w H/(s_{u0}+\rho H)$
1	2	0.2	1.4	1.774	2.957
2	2	0.2	1.4	2.661	2.957

No	V_{max}	M_{max}	$FSV_{max}/(s_{u0}+\rho H)H$	$FSM_{max}/(s_{u0}+\rho H)H^2$
1	23.51	31.68	1.738	1.171
2	93.62	253.63	1.730	1.172

รูปที่ 5 การตรวจสอบตัวแปรไร้มิติ

จากรูปที่ 5 สามารถสรุปได้ว่า ผลตัวแปรไร้มิติเป็นฟังก์ชันของค่าป้อนเข้าแบบตัวแปรไร้มิติ คือ

1. $FS\gamma_w/(s_{u0}+\rho H) = f(L/H\ ,\ \rho H/s_{u0})$

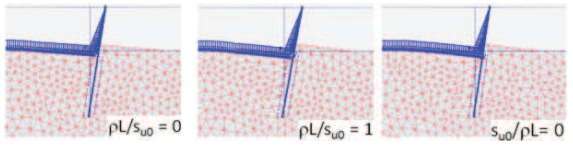
2. $FSV_{max}/(s_{u0}+\rho H)H = f(L/H\ ,\ \rho H/s_{u0})$

3. $FSM_{max}/(s_{u0}+\rho H)H^2 = f(L/H\ ,\ \rho H/s_{u0})$

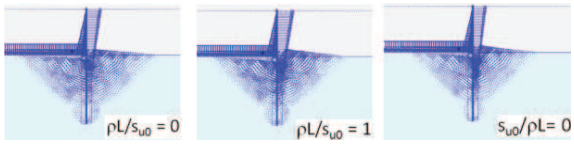
อนึ่งจากผลการวิเคราะห์หาผลเฉลยของกำแพงกันน้ำด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์พบว่าตัวแปร γ/γ_w ในช่วง 1.4 - 1.8 ไม่มีผลต่อเสถียรภาพของกำแพง ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อกำแพงจึงเหลือเพียงแค่ L/H และ $\rho H/s_{u0}$ เท่านั้น

รูปที่ 6 - 8 แสดงตัวอย่างการวิบัติ (Failure mechanism) ของกำแพงกันน้ำจากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ผลการวิบัติประกอบด้วย Deformed mesh, Total increment vector และ Incremental shear strain contour เปรียบเทียบระหว่าง 3 กรณีคือ $\rho H/s_{u0} = 0,\ 1,\ \infty$ โดยทั้ง 3 กรณีเป็นกำแพงกันน้ำที่มี L/H = 1.5 จากรูปพบว่าลักษณะการวิบัติของทั้ง 3 กรณีมีลักษณะคล้ายกัน กำแพงยื่นถูกผลักให้หมุนเอียงไปด้านที่ไม่มีน้ำ และมีจุดหมุนใกล้กับปลายของกำแพง ขนาดของบริเวณวิบัติของดินแนวราบทั้ง 2 ด้านมีความกว้างประมาณ 1 เท่าของระยะฝังของกำแพง อย่างไรก็ตาม ขอบเขตการวิบัติแนวดิ่งจะลึกลงไปเพียงปลายของกำแพงเท่านั้น

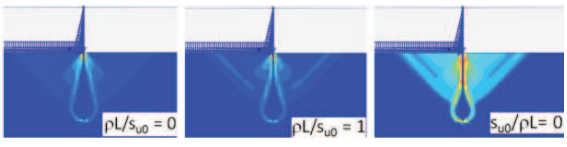
รูปที่ 9 แสดงผลตัวอย่างไดอะแกรมแรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นตลอดความสูงและระยะฝังของกำแพง จาก



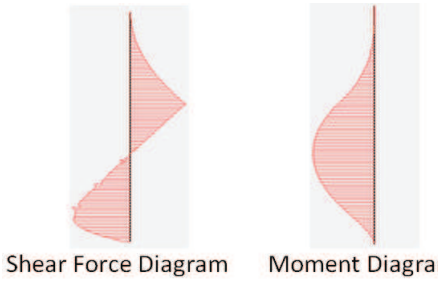
รูปที่ 6 Deformed mesh



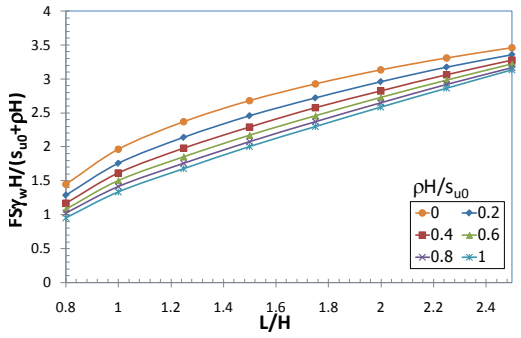
รูปที่ 7 Total increment vector



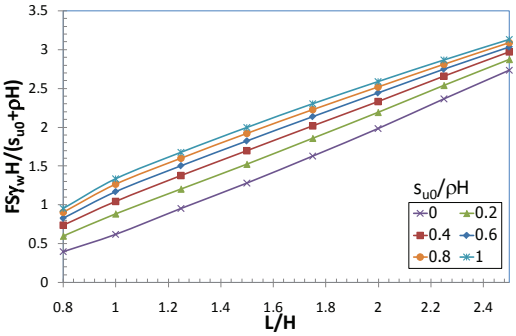
รูปที่ 8 Incremental shear strain contour



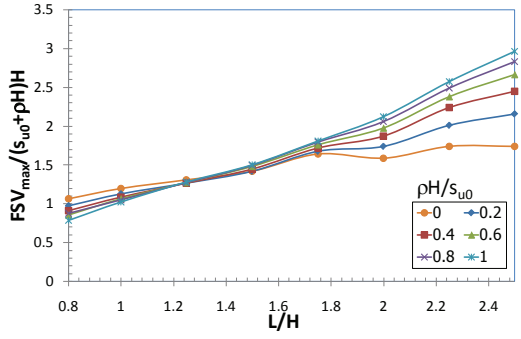
รูปที่ 9 ตัวอย่างไดอะแกรมแรงเฉือนและโมเมนต์



รูปที่ 10 ผลเฉลยตัวเลขเสถียรภาพที่ $\rho H/s_{u0}$ = 0 - 1



รูปที่ 11 ผลเฉลยตัวเลขเสถียรภาพที่ $s_{u0}/\rho H$ = 0 - 1



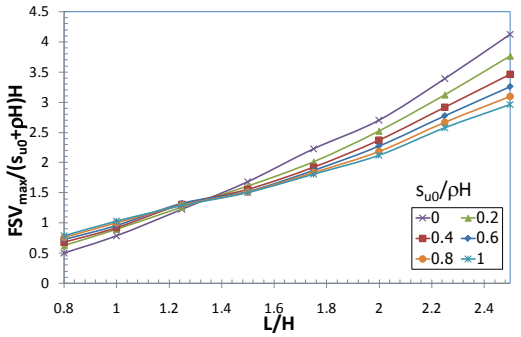
รูปที่ 12 ผลเฉลยแรงเฉือนสูงสุดที่ $\rho H/s_{u0}$ = 0 - 1

การวิเคราะห์พบว่าทุกกรณีมีไดอะแกรมแรงเฉือนและโมเมนต์ที่คล้ายกัน กล่าวคือ แรงเฉือนมากที่สุดอาจเกิดขึ้นบริเวณผิวดินหรือใกล้กับปลายกำแพง โมเมนต์มากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งแรงเฉือนเป็นศูนย์ซึ่งอยู่ใต้ผิวดินเป็นระยะค่าหนึ่ง

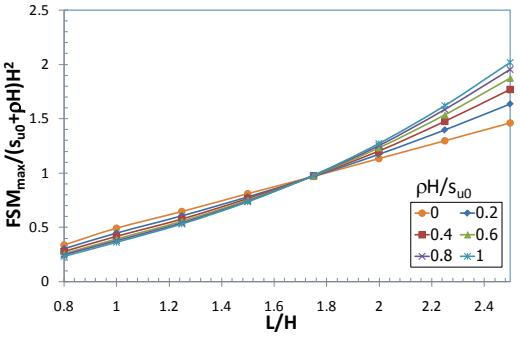
รูปที่ 10 – 11 แสดงความสัมพันธ์ของตัวเลขเสถียรภาพของกำแพงกันน้ำในดินเหนียว, $FS\gamma_w/(s_{u0}+\rho H)$ และอัตราส่วนระยะฝังกำแพงต่อความสูง L/H โดยกราฟแต่ละเส้นในรูปที่ 10 แสดงการเพิ่มขึ้นของ $\rho H/s_{u0}$ ตั้งแต่ 0 - 1 ส่วนในรูปที่ 11 กราฟแต่ละเส้นแสดงการเพิ่มขึ้นของ $s_{u0}/\rho H$ ตั้งแต่ 0 – 1

รูปที่ 10 – 11 สามารถใช้ในการออกแบบหาความลึกของกำแพงที่ฝังในดิน L เพื่อให้มีค่าความปลอดภัย FS ตามที่ต้องการ หรือสามารถใช้ตรวจสอบย้อนกลับเพื่อหาค่าความปลอดภัยจากกำแพงที่สร้างไว้แล้วได้เช่นกัน

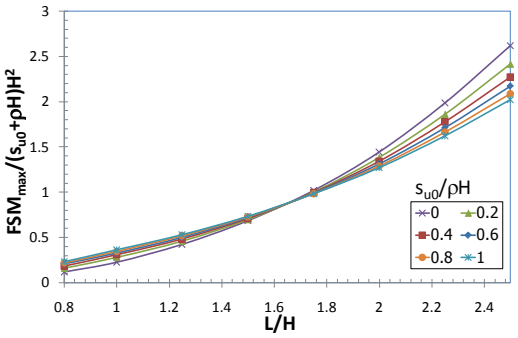
รูปที่ 12 - 13 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงเฉือนสูงสุด $FSVmax/(s_{u0}+\rho H)H$ ที่เกิดขึ้นในกำแพงเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการฝังของกำแพงต่อความสูง L/H ใน



รูปที่ 13 ผลเฉลยแรงเฉือนสูงสุดที่ $s_{u0}/\rho H$ = 0 - 1



รูปที่ 14 ผลเฉลยโมเมนต์สูงสุดที่ $\rho H/s_{u0}$ = 0 - 1



รูปที่ 15 ผลเฉลยโมเมนต์สูงสุดที่ $s_{u0}/\rho H = 0 - 1$

ทำนองเดียวกัน รูปที่ 14 - 15 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโมเมนต์สูงสุด $FSM_{max}/(s_{u0}+\rho H)H^2$ และอัตราส่วนการฝังของกำแพงต่อความสูง L/H โดยกราฟแต่ละเส้นในรูปที่ 12 และ 14 แสดงการเพิ่มขึ้นของ $\rho H/s_{u0}$ ตั้งแต่ 0 - 1 ส่วนในรูปที่ 13 และ 15 กราฟแต่ละเส้นจะแสดงการเพิ่มขึ้น $s_{u0}/\rho H$ ตั้งแต่ 0 - 1

จากรูปที่ 12 - 15 สามารถใช้หาแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นกำแพงเพื่อตรวจสอบหรือออกแบบความหนาของกำแพง รวมไปถึงจำนวนเหล็กเสริมที่จำเป็นต้องใส่ในกำแพงเพื่อให้เพียงพอต่อแรงดันจากน้ำที่กระทำกับกำแพง

อนึ่ง พจน์ $\rho H/s_{u0}$ หรือ $s_{u0}/\rho H$ ครอบคลุมทุกๆค่าของอัตราการเพิ่มเป็นเส้นตรงของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในทุกๆกรณี $\rho H/s_{u0}$ มีค่าตั้งแต่ 0 - ∞ หรือ $s_{u0}/\rho H$ มีค่าตั้งแต่ ∞ - 0 เช่นเดียวกัน กรณีที่ $\rho = 0$ หมายถึงกำลังรับแรงเฉือนมีค่าคงที่ตลอดความลึก หรือ $\rho H/s_{u0} = 0$ และในทางตรงกันข้าม $s_{u0} = 0$ หมายถึง กรณีที่กำลังรับแรงเฉือนบนผิวดินมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งเป็นกรณีของดินเหนียวบริเวณชายฝั่งและกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นจากศูนย์เป็นเส้นตรงกับความลึก อย่างไรก็ตาม พจน์ s_{u0} และ ρ มีค่าเป็นศูนย์พร้อมกันไม่ได้เพราะหมายถึงดินไม่มีกำลังเลย ซึ่งทำให้กำแพงกันน้ำไม่มีเสถียรภาพไม่ว่าจะฝังด้วยระยะฝังใดก็ตาม

จากรูปที่ 10 – 15 จะเห็นได้ว่าผลเฉลยในรูปตารางการออกแบบมีจำนวนมากและการประยุกต์ใช้งานอาจมีการประมาณภายในช่วง (Interpolation) หรือ การประมาณนอกช่วง (Extrapolation) จากตารางการออกแบบ ทำให้เสียเวลาจากการประมาณและเกิดความผิดพลาด ไม่สะดวก และยุ่งยาก ดังนั้น เพื่อที่จะแก้ปัญหาจากความยุ่งยากในการประมาณค่าจากตาราง การใช้ผลเฉลยในรูปของสมการจะทำให้การวิเคราะห์ปัญหาสะดวกรวดเร็วขึ้น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ 2 ตัวแปร คือ $y = f(x_1, x_2)$ คุณสมบัติของสมการผลเฉลยควรมีดังนี้

1. ต้องใช้เพียง 1 สมการเท่านั้นต่อผลเฉลย 1 พจน์
2. ต้องสามารถคำนวณได้ในทุกค่าของ x_1 และ x_2 เช่น $x_2 = \infty$ หรือ $x_2 = 0$
3. ต้องมีความแม่นยำมากและสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลเฉลยของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์
4. สมการผลเฉลยของตัวเลขเสถียรภาพ แรงเฉือนสูงสุด และโมเมนต์สูงสุดของกำแพงกันน้ำ

ตัวแปรผลจากการวิเคราะห์ y มี 3 กรณีคือ

1. ตัวเลขเสถียรภาพ

$$y_s = FS(\frac{\gamma_w H}{s_{u0} + \rho H})$$

2. แรงเฉือนสูงสุด

$$y_v = FS(\frac{V_{max}}{(s_{u0} + \rho H)H})$$

3. โมเมนต์สูงสุด

$$y_m = FS(\frac{M_{max}}{(s_{u0} + \rho H)H^2})$$

รูปแบบของสมการคณิตศาสตร์ที่นำเสนอและสอดคล้องกับผลเฉลยของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์มีดังนี้

$$y = \frac{A_6 x_1 x_2{}^2 + A_3 x_2{}^2 + A_5 x_1 x_2 + A_2 x_2 + A_4 x_1 + A_1}{A_{11} x_1 x_2{}^2 + A_8 x_2{}^2 + A_{10} x_1 x_2 + A_7 x_2 + A_9 x_1 + 1} \quad (2)$$

โดย $x_1 = \frac{L}{H}$ = อัตราส่วนระยะฝังกำแพงต่อความสูง

$x_2 = \frac{\rho H}{s_{u0}}$ = อัตราส่วนแรงเฉือนเพิ่มตามความลึก

$A_1 - A_{11}$ = สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

อนึ่ง สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_1 - A_{11} ของแต่ละกรณี y คือ y_s, y_v และ y_m มีค่าแตกต่างกัน

สมการที่ (2) ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (FS) ของกำแพงที่สร้างไว้แล้ว โดยตัวแปรที่ต้องรู้ก่อนล่วงหน้าคือระยะฝังของกำแพง L และความสูงของระดับน้ำ H

จากสมการที่ (2) อัตราส่วนระยะฝัง x_1 ของกำแพงสามารถหาได้ดังนี้

$$x_1 = -\frac{A_8 y x_2{}^2 + A_7 y x_2 - A_3 x_2{}^2 - A_2 x_2 + y - A_1}{A_{11} y x_2{}^2 + A_{10} y x_2 - A_6 x_2{}^2 + A_9 y - A_5 x_2 - A_4} \quad (3)$$

กรณีพิเศษ เมื่อตัวแปร $x_2 = \rho H/s_{u0}$ มีค่าเท่ากับ ∞ หรือ s_{u0} มีค่าเท่ากับ 0 สมการที่ (2) และ (3) สามารถหาค่าได้โดยใช้ลิมิตของฟังก์ชันของสมการ (2) และ (3) ดังนี้

$$\lim_{x_2 \to \infty} y = \frac{A_6 x_1 + A_3}{A_{11} x_1 + A_8} \quad (4)$$

$$\lim_{x_2 \to \infty} x_1 = \frac{(A_3 - A_8 y)}{A_{11} y - A_6} \quad (5)$$

การหาค่าคงที่ A_1 - A_{11} ทั้งสามกรณีนี้ ผู้เขียนใช้วิธี Nonlinear Least Square Method เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด จากสมการที่ (6) ดังนี้

$$Minimize(error^2) = Minimize(\sum_{i=1}^{n}(y_i - f_i)^2) \quad (6)$$

โดย y_i = ผลเฉลยจากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

f_i = ผลเฉลยจากสมการ

จำนวนข้อมูล $n = 88$

การตรวจสอบความแม่นยำของสมการผลเฉลยที่เสนอใช้ Coefficient of Determination (R-squared), R^2 จากสมการที่ (7)

$$R^2 = \frac{1 - SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (7)$$

โดย $SS_{res} = \sum_{i=1}^{n}(y_i - f_i)^2$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2$$

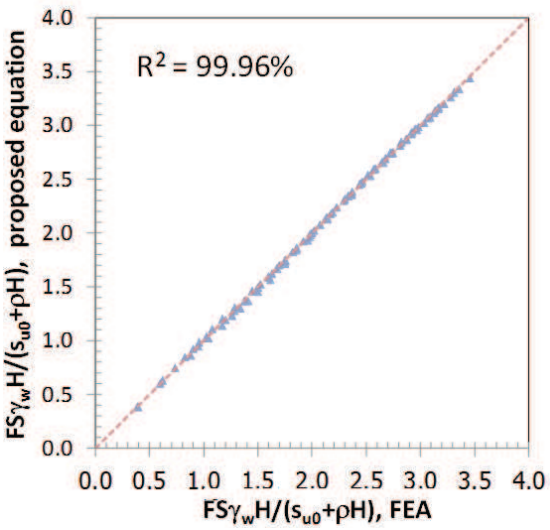
ดังนั้น ค่า R^2 เป็นค่าที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละระหว่างผลเฉลยที่ได้จากสมการผลเฉลยและผลที่ได้จากที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ว่ามีความสัมพันธ์กันมากเท่าไหร่ โดยที่ R^2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0 % - 100 % ถ้าสมการและข้อมูลมีความสัมพันธ์อย่างดี ค่า R^2 มีค่าใกล้เคียง 100 % หรือกล่าวได้ว่า ยิ่งค่า R^2 มีค่ามากใกล้ 100% สมการผลเฉลยก็มีความแม่นยำสูงมาก

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ A_1 - A_{11} จากวิธี Nonlinear least square ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปร y โดย Column แรกเป็นกรณีของตัวเลขเสถียรภาพ Column ที่สองเป็นกรณีของแรงเฉือนสูงสุด และ Column ที่สามเป็นกรณีของโมเมนต์สูงสุด อนึ่งค่า R^2 ของทั้ง 3 กรณีมีค่าประมาณ 99% ซึ่งแสดงว่าสมการผลเฉลยมีความแม่นยำสูงมาก

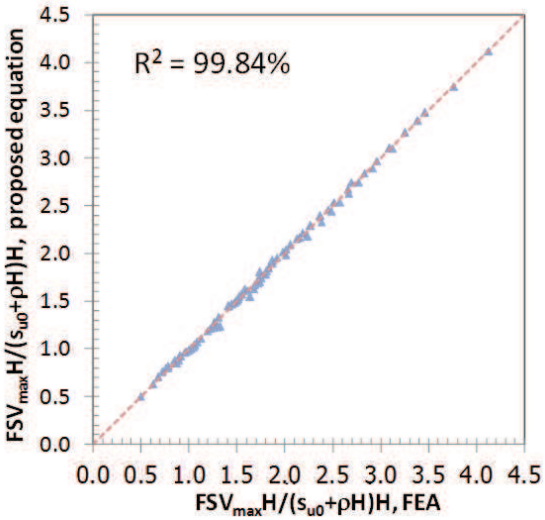
ตารางที่ 1 ค่าคงที่ $A_1 - A_{11}$ ของตัวแปร y ทั้ง 3 กรณี

y	$\frac{FS\gamma_w H}{s_{u0} + \rho H}$	$\frac{FSV_{max}}{(s_{u0} + \rho H)H}$	$\frac{FSM_{max}}{(s_{u0} + \rho H)H^2}$
A_1	-4.43601	0.09720	-0.19051
A_2	-0.08319	12.03216	-0.19844
A_3	-2.41807	-5.12803	-1.24192
A_4	10.48999	1.97690	0.67674
A_5	11.32770	3.94243	1.80050
A_6	5.09115	11.96792	1.83292
A_7	7.10042	18.56341	5.07991
A_8	4.55423	10.14280	3.41832
A_9	2.13275	0.74145	0.01238
A_{10}	0.87047	-4.01657	-1.14523
A_{11}	-0.32035	-1.65045	-0.86117
R^2	99.96%	99.84%	99.96%

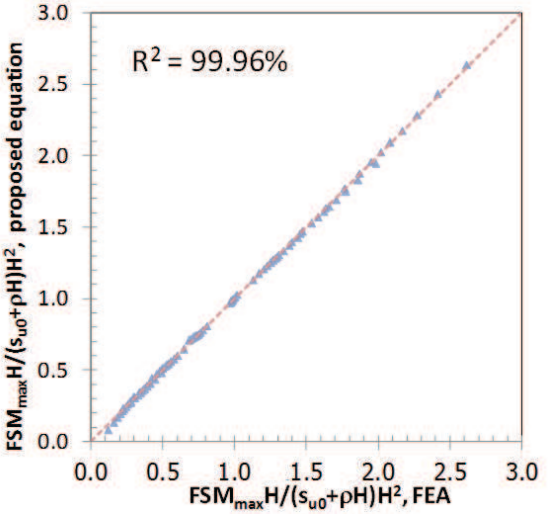
รูปที่ 16 – 18 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยจากสมการและผลเฉลยจากการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ของแต่ละกรณี ทั้งกรณีตัวเลขเสถียรภาพ แรงเฉือนสูงสุด และโมเมนต์สูงสุด จากรูปทั้งสามนั้นจะเห็นได้ว่า สมการผลเฉลยและข้อมูลของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ พล็อตอยู่บนเส้น 45 องศา



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบตัวแปร y ของตัวเลขเสถียรภาพ



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบตัวแปร y ของแรงเฉือนสูงสุด



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบตัวแปร y ของโมเมนต์สูงสุด

เกือบทุกข้อมูล ซึ่งหมายถึงเงื่อนไขของสมการและข้อมูลมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี หรืออาจดูได้จากค่า R^2 = 99% ใกล้เคียงกับ 100% ซึ่งเป็นกรณีสอดคล้องสมบูรณ์

5. การประยุกต์ใช้งานสมการผลเฉลย

ตัวอย่าง 1 กำหนดให้ γ_w = 10 kN/m^3, H = 2.5 m, L = 5 m, s_{u0} = 15 kPa และ ρ = 0 kPa/m จงคำนวณหา FS, V_{max} และ M_{max}

Step 1 หา FS โดยคำนวณหาตัวแปรไร้มิติได้ค่าต่างๆ ดังนี้

- $x_1 = L/H = 2$
- $x_2 = \rho H/s_{u0} = 0$
- หา $y_s = FS\gamma_w/(s_{u0}+\rho H)$

แทนค่าตัวแปร x_1, x_2 และค่าคงที่ $A_1 - A_{11}$ ของ Column 1 ของตารางที่ 1 ลงในสมการที่ (2) ได้ผลคือ y_s = 3.142

ดังนั้น $FS = y_s(s_{u0}+\rho H)/\gamma_w$ = 1.89

Step 2 คำนวณหา V_{max} และ M_{max} โดยมีตัวแปรไร้มิติต่างๆดังนี้

- $y_v = FSV_{max}/(s_{u0}+\rho H)H$
- $y_m = FSM_{max}/(s_{u0}+\rho H)H^2$

แทนค่า FS, x_1, x_2 และค่าคงที่ $A_1 - A_{11}$ ของ Column 2 และ 3 ของตารางที่ 1 ลงในสมการที่ (2) ผลที่ได้คือ y_v = 1.632 และ y_m = 1.135

ดังนั้น $V_{max} = y_v(s_{u0}+\rho H)H/FS$ = 32.46 kN/m

และ $M_{max} = y_m(s_{u0}+\rho H)H2/FS$ = 56.44 kNm/m

ตัวอย่าง 2 กำหนดให้ γ_w = 10 kN/m^3, H = 2.5 m, s_{u0} = 20 kPa, ρ = 2 kPa/m และ FS = 2 จงคำนวณหา L, V_{max} และ M_{max}

Step 1 หา FS โดยคำนวณหาค่าตัวแปรไร้มิติได้ค่าต่างๆ ดังนี้

- $x_2 = \rho H/s_{u0}$ = 0.25
- $y_s = FS\gamma_w/(s_{u0}+\rho H)$ = 2
- หา $x_1 = L/H$

แทนค่า x_2, y_2 และค่าคงที่ $A_1 - A_{11}$ ของ Column ที่ 1 ลงในสมการที่ (3) ได้ผลคือ x_1 = 1.195

ดังนั้น $L = x_1 H$ = 2.987 m เลือกใช้ L = 3 m และค่า $x_1 = L/H = 3/2.5 = 1.2$

Step 2 เมื่อทราบ x_1 ก็สามารถคำนวณหา V_{max} และ M_{max} ได้ โดยมีตัวแปรไร้มิติต่างๆดังนี้

- $y_v = FSV_{max}/(s_{u0}+\rho H)H$
- $y_m = FSM_{max}/(s_{u0}+\rho H)H^2$

แทนค่า FS, x_1, x_2 และค่าคงที่ $A_1 - A_{11}$ ของ Column 2 และ 3 ของตารางที่ 1 ลงในสมการที่ (2) ผลที่ได้คือ y_v = 1.236 และ y_m = 0.557

ดังนั้น $V_{max} = y_v(s_{u0}+\rho H)H/FS$ = 38.64 kN/m

และ $M_{max} = y_m(s_{u0}+\rho H)H^2/FS$ = 43.52 kNm/m

ตัวอย่าง 3 กำหนดให้ γ_w = 10 kN/m^3, H = 2 m, L = 5 m, s_{u0} = 0 kPa และ ρ = 5 kPa/m จงคำนวณหา FS, V_{max} และ M_{max}

Step 1 หา FS โดยคำนวณหาค่าตัวแปรไร้มิติได้ค่าต่างๆดังนี้

- $x_1 = L/H = 2.5$
- $x_2 = \rho H/s_{u0} = \infty$
- หา $y_s = FS\gamma_w/(s_{u0}+\rho H)$

เนื่องจาก $x_2 = \infty$ สมการที่ใช้ในการคำนวณหา y_s จึงเป็นสมการที่ (4)

แทนค่าตัวแปร x_1, x_2 และค่าคงที่ A_3, A_6, A_8 และ A_{11} ใน Column ที่ 1 ของตารางที่ 1 ลงในสมการที่ (4) ได้ผลคือ y_s = 2.747

ดังนั้น $FS = y_s(s_{u0}+\rho H)/\gamma_w = 1.37$

Step 2 คำนวณหา V_{max} และ M_{max}

แทนค่า FS, x_1, x_2 และค่าคงที่ A_3, A_6, A_8 และ A_{11} ของ Column 2 และ 3 ของตารางที่ 1 ลงในสมการที่ (4) ผลที่ได้คือ y_v = 4.121 และ y_m = 2.640

ดังนั้น $V_{max} = y_v(s_{u0}+\rho H)H/FS = 60.00$ kN/m

และ $M_{max} = y_m(s_{u0}+\rho H)H^2/FS = 76.88$ kNm/m

6. สรุป

งานวิจัยนี้เสนอเสถียรภาพแบบไม่ระบายน้ำของกำแพงกันน้ำในดินเหนียวบนระนาบความเครียด 2 มิติด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ จากผลศึกษาผลเฉลยเสถียรภาพของกำแพงกันน้ำขึ้นอยู่กับตัวแปรไร้มิติต่อไปนี้

1. $x_1 = L/H$ = อัตราส่วนระยะฝังกำแพงต่อความสูง
2. $x_2 = \rho L/s_{u0}$ = อัตราส่วนแรงเฉือนเพิ่มตามความลึกต่อแรงเฉือนที่ผิวดิน

ผลเฉลยเสถียรภาพของกำแพงกันน้ำถูกนำเสนอในรูปของตัวแปรไร้มิติต่อไปนี้

1. เสถียรภาพเชิงตัวเลข, $FS\gamma_w/(s_{u0}+\rho H)$
2. แรงเฉือนสูงสุด, $FSV_{max}/(s_{u0}+\rho H)H$
3. โมเมนต์สูงสุด, $FSM_{max}/(s_{u0}+\rho H)H2$

Design Charts นำเสนอผลเฉลยที่ได้จากข้อมูลของ วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในรูปของตัวแปรไร้มิติของทุกกรณี นอกเหนือจากนี้ สมการผลเฉลยของ $FS\gamma_w/(s_{u0}+\rho H)$, $FSV_{max}/(s_{u0}+\rho H)H$ และ $FSM_{max}/(s_{u0}+\rho H)H^2$ สอดคล้องเป็นอย่างดีกับข้อมูลผลเฉลยของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ทุกกรณี โดย R^2 = 99% การประยุกต์ใช้งานสมการผลเฉลยจากตัวอย่างที่นำเสนอแสดงให้เห็นว่าสมการผลเฉลยทำให้การวิเคราะห์และออกแบบกำแพงกันน้ำได้อย่างแม่นยำ รวดเร็วในทุกกรณีและลดความผิดพลาดในการประมาณจากผลเฉลยของตารางสำหรับการออกแบบ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Bea R.G. Failure of the New Orleans 17th Street Canal levee & floodwall during hurricane Katrina. GEOCONGRESS 08. 2008. (In USA)

[2] Yuan Y, Whittle A.J. Evaluation and prediction of 17th Street Canal I-wall stability using numerical limit analyses. Forthcoming in Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2014. (In USA)

[3] Ukritchon B. Application of Numerical limit analyses for Undrained stability problems in clay. [PhD Thesis]. Massachusetts Institute of technology; 1998. (In USA)

[4] Blowes J. E. Foundation Analysis and Design. 5th ed. McGraw-Hill. 2001.

[5] Brinkgreve R.B.J, et al. Plaxis 2D Version 8 Manual. A.A. Balkema Publishers. 2002.

[6] US Army Corps of Engineers. Performance Evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana Hurricane Protection System. 2006.

[7] Risk Communication Katrina Lessons. 2011. Available from: URL: http://thaipublica.org/2011/10/risk-communication-katrina-lessons

The Operation of Direct-contact Condenser at Thermodynamic Equilibrium

Somchart Chantasiriwan
Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum Thani 12121

Abstract

Multiple-effect evaporators and crystallizers in the sugar industry operate under vacuum, which may be generated by using direct-contact condensers. The condenser uses cooling water to condense the vapor from the evaporator or the crystallizer, whereas a vacuum pump removes both uncondensed vapor and incondensable gases from the condenser, which results in sub-atmospheric pressure in the system. Factors influencing the amount of vacuum that can be achieved include the flow rate of cooling water, the water temperature, and the flow rate of mixture removed by the vacuum pump. There has been limited analytical study of the system of evaporator and condenser. Therefore, the understanding of the influences of these factors is mostly qualitative. This paper aims at quantifying factors influencing the performance of the system of evaporator and condenser using the assumption that system is at thermodynamic equilibrium. Results from this study should enable the control of vacuum in the system to be more efficient.

Keywords : vacuum, condenser, thermodynamics

1. Introduction

Many industrial processes require evaporation of water at sub-atmospheric pressures. An example is the evaporation process in the production of raw sugar in a crystallizer and the last effect of a multiple-effect evaporator. Benefits of evaporation under vacuum condition are twofold. First, it allows the input steam to be used as a heating medium many times before it becomes condensate. As a result, the amount of removed water exceeds the amount of input steam. In other words, the steam economy will be greater than unity. Second, evaporation at a low pressure occurs at also a low temperature, which is beneficial to the quality of produced raw sugar.

Because the pressure of saturated vapor is a function of temperature, the reduction of pressure can be achieved by decreasing the vapor temperature. With sufficient temperature reduction and the corresponding pressure reduction, a vacuum will be created. The equipment used for this task is a condenser. The type of condenser normally used in sugar factories is the direct-contact condenser, which has advantages of cheap construction and the ability to achieve a close approach of temperature. The direct-contact condenser operates by mixing vapor with cooling water from either spray ponds or cooling towers.

Normally, not all of the vapor is condensed by cooling water. The remaining vapor must be removed by a vacuum pump. In addition to removing uncondensed vapor, the vacuum pump also removes incondensable gases. Sources of incondensable gases are dissolved gases in cooling water, air leaking into the crystallizer or the evaporator, and gases dissolved or entrained in the juice or syrup. Unless removed, the accumulation these gases will keep on rising, interfering with the condensation process and raising condenser pressure.

Three important factors that affect the vacuum condition in the condenser are the cooling water temperature, the cooling water flow rate, and the volumetric flow rate of the vapor and gases removed by the vacuum pump. Since the first one is uncontrollable, the control of a vacuum in the condenser requires the control of the last two factors. It is a common practice to vary the cooling water flow rate in response to changing cooling water temperature. It is

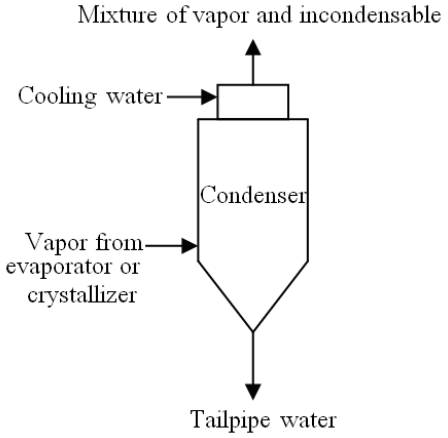


Figure 1: Inputs and outputs of direct-contact condenser

well known qualitatively that, with a fixed vacuum, required cooling water flow increases with cooling water temperature. The objective of this paper is to derive quantitative relationships between condenser pressure and the three factors that affect the pressure based on the analysis of the steady-state operation of direct-contact condenser.

2. Description of the System

Figure 1 illustrates the operation of the direct-contact condenser. Vapor from the evaporator and cooling water enter the condenser, whereas tailpipe water and the mixture of vapor and incondensable gases leave the condenser. The type of condenser shown in Fig. 1 is the counter-flow type because vapor flows upward, and cooling water flows downward. An alternative condenser type is the parallel-flow type, in which both vapor and cooling water flow downward. Condenser is designed so that all vapor is condensed with the minimum use of cooling water. Therefore, cooling water enters in forms of jets, sprays, or water curtain to promote mixing with vapor. Furthermore, trays or perforated plates are installed inside the condenser to increase the mixing time.

3. Analysis of the System

There has been limited publication related to the system of condenser and vacuum pump. Love [1] presents a simple model that can be used to study the performance of condenser under various conditions. The analysis in this paper is based on his work, but certain modifications are made in the proposed model of condenser. The following assumptions are made in the development of the model.

• The condenser is at thermodynamic equilibrium with the evaporator and the vacuum pump.

• Pressure drop across the condenser is negligible, since, according to Hugot [2], it is about 0.4 kPa.

• Vapor and air behave like ideal gases with constant specific heat capacities.

• All cooling water is mixed with vapor; no cooling water bypasses the mixing process.

• Mixing between cooling water and vapor is homogeneous. The mixture is saturated liquid water.

• There is no droplet carry-over in the mixture of vapor and incondensable gases at the exit of condenser.

• Thermodynamic properties of incondensable gases and air are identical.

The schematic representation of the operation of condenser is shown in Fig. 2. The vapor flow rate into the condenser (m_v) is the sum of vapor mixed with cooling water (m_{v1}) and unmixed vapor (m_{v2}). The latter is determined from mass balance at the exit from the condenser to the vacuum pump.

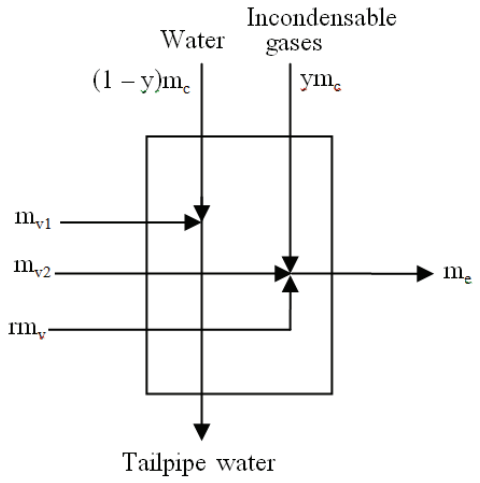


Figure 2: Mass flows in direct-contact condenser

$$m_{v2} = m_e - rm_v - ym_c \quad (1)$$

where r is the ratio of mass of incondensable gases to vapor mass, and y is the fraction of incondensable gases dissolved in cooling water. The thermodynamic equilibrium between the condenser and the vacuum pump implies that

$$p_e = \frac{p}{1+\left(M_w/M_a\right)\left(rm_v + ym_c\right)/m_{v2}} \quad (2)$$

The molecular weights of water and air are, respectively, $M_w = 18.00$ and $M_a = 28.97$.

Since the vapor at the exit of the condenser is saturated, the temperature of the mixture of vapor and incondensable gases leaving the condenser (T_e) can be determined from the corresponding pressure (p_e).

$$T_e = -227.03 + \frac{3816.44}{18.3036 - \ln\left(7.5p_e\right)} \quad (3)$$

The energy balance equation is used to find m_{v1}.

$$m_{v1} = \frac{1}{h_{vl}(T_i)}\Big\{(1-y)m_c c_{pw}(T_i - T_c) + m_{v2}[h_v(T_e) - h_v(T_i)] + rm_v c_{pa}(T_e - T_i) + ym_c c_{pa}(T_e - T_c)\Big\} \quad (4)$$

where c_{pw} is the specific heat capacity of water (4.18 kJ/kg.K) and c_{pa} is the specific heat capacity of air (1.00 kJ/kg.K). Specific heat of evaporation (h_{vl}) and enthalpy of saturated steam (h_v) are given by Rein [3].

$$h_{vl}(T) = 2492.9 - 2.0523T - 3.0752 \times 10^{-3} T^2 \quad (5)$$

$$h_v(T) = 2502.04 + 1.8125T + 2.585 \times 10^{-4} T^2 - 9.8 \times 10^{-6} T^3 \quad (6)$$

The thermodynamic equilibrium at the inlet to the condenser requires that the total pressure of the mixture is equal to the condenser pressure (p). Therefore, the vapor pressure (p_v) may be expressed as.

$$p_v = \frac{p}{1+r\left(M_w/M_a\right)} \quad (7)$$

The corresponding vapor temperature (T_v) can be determined from pv using Eq. (3) because the vapor is assumed to be saturated. Since $m_v = m_{v1} + m_{v2}$, Eqs. (1) and (4) may be combined into

$$\{(1+r)h_{vl}(T_v) + r[h_v(T_e) - h_v(T_v) - c_{pa}(T_e - T_v)]\}m_v = [h_{vl}(T_v) + h_v(T_e) - h_v(T_v)]m_e + \{yc_{pa}(T_e - T_c) + (1-y)c_{pw}(T_v - T_c) - y[h_{vl}(T_v) + h_v(T_e) - h_v(T_v)]\}m_c \quad (8)$$

where m_c and T_c are the mass flow rate and the temperature of the cooling water, respectively.

The above analysis is based on the assumption that m_c is not too large because Eq. (1) indicates that m_{v2} may be negative. In reality, there must be a minimum amount vapor ($m_{v2,min}$) left at the exit of the condenser because the mixture exchanges heat with the cooling water, and the temperature of the mixture leaving the condenser cannot be lower than the cooling water temperature [4]. It occurs when mc is larger than the critical value ($m_{c,crit}$). Under this situation, the amount of cooling water involved in the mixing process is mc,crit, and the remaining cooling water bypasses the mixing process. The expression for $m_{v2,min}$ is as follows.

$$m_{v2,min} = \left(\frac{M_w/M_a}{p/p_c - 1}\right)\left(rm_v + ym_{c,crit}\right) \quad (9)$$

where p_c is the vapor pressure corresponding to T_c.

$$p_c = \frac{1}{7.5}\exp\left[18.3036 - \frac{3816.44}{\left(227.03 + T_c\right)}\right] \quad (10)$$

Equations (1) and (9) can now be solved for $m_{v2,min}$ and $m_{c,crit}$ in terms of m_v and m_e.

$$m_{v2,min} = \left[\frac{M_w p_c}{M_a\left(p - p_c\right) + M_w p_c}\right]m_e \quad (11)$$

$$m_{c,crit} = \frac{1}{y}\left[\frac{m_e}{\left(M_w/M_a\right)/\left(p/p_c - 1\right) + 1} - rm_v\right] \quad (12)$$

Substituting $m_{v2,min}$ and $m_{c,crit}$ from Eqs. (11) and (12), and $T_e = T_c$ yields

$$\left[h_{vl}(T_v)+yc_{pa}(T_v-T_c)+\frac{r}{y}(1-y)c_{pw}(T_v-T_c)\right]m_v =$$
$$\left\{\left[\frac{M_w p_c}{M_a(p-p_c)+M_w p_c}\right]\left[h_{vl}(T_v)+h_v(T_c)-h_v(T_v)\right]\right.$$
$$\left.\frac{1}{y}\left[\frac{(1-y)c_{pw}(T_v-T_c)}{M_w p_c/M_a(p-p_c)+1}\right]\right\}m_e \qquad (13)$$

Assume that m_v and p_v are fixed. Equation (8) provides a relationship among mc, T_c and m_e when $m_c < m_{c,crit}$, whereas Eq. (13) provides a relationship between T_c and me when $m_c > m_{c,crit}$. It should be noted that both equations are nonlinear. Solutions must, therefore, be obtained by iteration.

4. Results and Discussion

Values of y = 3.5 x10^{-5} and r = 0.003 provided by Love [1] are used in the simulation of the operation of direct-contact condenser according to the model described in the previous section. Figure 3 shows the result of simulation when m_v = 5 kg/s and T_c = 35 °C. It can be seen that p and T_e decrease monotonically with m_c until T_e reaches 35 °C. After that, p and T_e remain constant because m_c reaches the critical value. A control system that uses the cooling water flow rate to control condenser pressure will, therefore, be effective only when the flow rate is less than the critical value. An attempt to control condenser when m_c exceeds $m_{c,crit}$ will result in a phenomenon known as "frozen condenser" as reported by Love [1].

In order to decrease condenser pressure after m_c reaches the critical value, m_e must be increased. It can be seen from Fig. 4 that p decreases as m_e increases. However, the effect of m_e on p is not noticeable before m_c reaches the critical value.

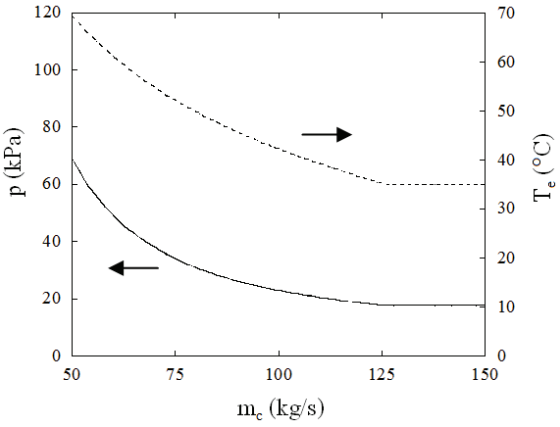


Figure 3: Variations of the condenser pressure (p) and the temperature of mixture leaving the condenser (T_e) with the mass flow rate cooling water (m_c)

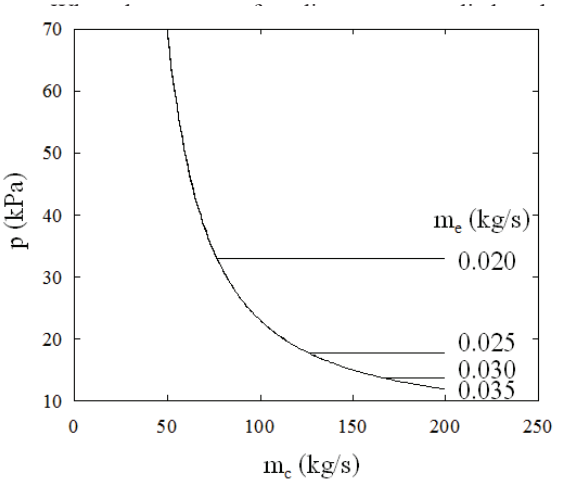


Figure 4: Effect of the mass flow rate exiting the condenser (m_e) on the variation of condenser pressure (p) with the mass flow rate cooling water (m_c)

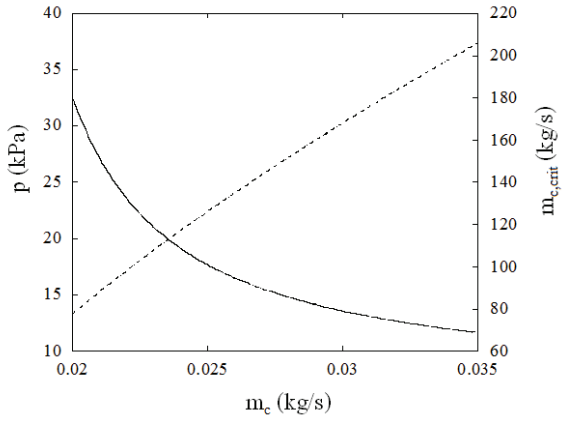


Figure 5: Variations of critical cooling water flow rate ($m_{c,crit}$) and the corresponding condenser pressure (p) with the mass flow rate exiting the condenser (m_e)

amount of cooling water involved in the mixing process with vapor is $m_{c,crit}$. The rest of cooling water becomes tailpipe water. When this occurs, only the increase of m_e can decrease p, as shown in Fig. 5. Also shown is the increase in $m_{c,crit}$ as m_e increases.

5. Conclusions

The understanding of the operation of direct-contact condensers has been mostly qualitative. The present study attempts to provide quantitative explanation of how condenser pressure are affected by factors such as cooling water flow rate, water temperature, and the flow rate of saturated gases removed by vacuum pump. The condenser is assumed to be at thermodynamic equilibrium, which means that gases at the inlet and outlet of the condenser are saturated with water vapor. Numerical results show that increasing water flow rate reduces condenser pressure and increases the temperature of saturated gases removed by vacuum pump until the temperature is equal to the cooling water temperature. After that, the water flow rate exceeds the critical value, and condenser pressure is longer affected by the water flow rate. In order to decrease condenser pressure when water flow rate is larger than the critical value, the vacuum pump must remove more saturated gases.

6. References

[1] Love DJ. Achieving and controlling vacuum in process vessels using condensers and vacuum pumps. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association. 2005: 79: 286-300.

[2] Hugot E. Handbook of Cane Sugar Engineering. Elsevier: Amsterdam; 1986.

[3] Rein P. Cane Sugar Engineering. Bartens: Berlin; 2007.

[4] Moult JM and Smits JH. Single tray rain type condensers. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association. 1979: 53: 98-102.

Lessons from Heartbleed

Chanathip Namprempre
Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering,
Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum Thani 12121

Abstract

Heartbleed is a major security flaw affecting many computer systems. It is easy to mount and leaves few traces. It allows an attacker to extract a portion of the memory contents of the targeted computer, which could be either a server or a client. Cryptography offers many tools that could have been used to mitigate the negative repercussions of this breach. Unfortunately, evidence suggests that not many of these tools were used by servers at the time of the announcement of Heartbleed. This paper describes what these tools are and how they could have helped. The goal is to raise awareness so that users and system administrators alike can understand the benefits that existing, well-known cryptographic tools have to offer to cope with practical attacks.

Keywords: public key cryptography, forward security, password-based cryptography.

1. Introduction

Heartbleed is a major security flaw affecting many computer systems. Its existence was announced in April 2014. Since then, it has ignited much interest among diverse groups of people, from server administrators, cryptographers, and programmers to common users and policy makers.

Heartbleed is easy to mount and leaves few traces. It allows an attacker to extract a portion of the memory contents of the targeted computer, which could be either a server or a client. The memory contents vulnerable to exposure could include many things such as the long-lived secret key of the server, the usernames and passwords of the users, and other information that may be contained in the payload being exchanged during the session.

The repercussions from the exposure of sensitive information are often costly to address. It would have been better if more had been done to limit the scope of damage in the event that secrets are exposed.

Cryptography offers many tools that could have been used to mitigate the negative repercussions of this breach. Unfortunately, evidence suggests that not many of these tools were used by servers at the time of the announcement of the attack. This paper describes what these tools are and how they could have helped improve the situation. The goal is to raise awareness so that users and system administrators alike can see and understand the benefits that existing, wellknown cryptographic tools have to offer to cope with practical attacks.

2. Background

Heartbleed exploits a flaw in OpenSSL, an implementation of the SSL/TLS protocol. In this section, we first discuss in general terms the need for and the basic ideas behind the SSL/TLS protocol.

2.1 Public key cryptography and the secure channel

Consider a typical interaction between a client and a server. The client is often a web browser operated by a user who would like to access resources on the server. The server ensures that an incoming request for resources indeed comes from a legitimate user by asking the user to type in his or her username and the corresponding password, which have presumably been registered with the server prior to the current communication session. Once the server verifies that the username and password are

correct, it allows the client to access the resources the user is authorized for.

We should note that even though this method is neither the only nor the best way to authenticate communicating parties and to protect the ensuing exchanges of information between them, it is by far the most popular and will be the focus of this paper.

THE KEY-THEN-DATA-EXCHANGE APPROACH. Since the username-password pair that a user sends to a server is the *information advantage* that distinguishes a legitimate user from someone without authorization for the requested resources, it should not be sent over the public network in the clear, lest it be easily captured by packet sniffers. A *secure channel* for transmission is needed. For the purposes of this paper, we can conceptually regard a secure channel as a pipe between two parties in which data being exchanged through the pipe are encrypted and authenticated. (It has long been accepted that "encryption without integrity checking is all but useless" [6].)

Given that symmetric-key cryptosystems are much more efficient than public-key ones, the bulk of the data exchange is almost always implemented with symmetric-key cryptographic primitives. However, requiring that every pair of client and server on the Internet possesses a shared secret key (a bitstring known only to the two of them and none others) before they can securely communicate is clearly impractical.

In practice, public-key cryptography is used to address this problem. A party holds a pair of public and secret keys which are generated in such a way that

- if the public key is used to encrypt a message to obtain a ciphertext, the secret key can be used to decrypt the ciphertext, and
- if the secret key is used to sign a message, the public key can be used to verify the signature.

There can be many other properties depending on the cryptosystems in question, but these two are the most well-known. For the purpose of building a secure channel between two parties, public-key cryptography is used to obtain a shared secret key between the parties, a process known as *key exchange* (KE). Bootstrapping from the public-secret key pairs of the participants, a key exchange protocol allows the two parties to arrive at a shared secret known only to them even if an adversary may, at the very least, observe the entire sequence of exchanges during the protocol's execution.

Currently, the most common kind of key exchange used in practice authenticates only one of the participants, namely the server. Specifically, after completing the key exchange protocol with a server, the client can be *somewhat* confident that the server is who it claims to be while the server has no idea who the client is. In most cases, the identity of the client is ascertained after the key exchange protocol completes via the submission of an appropriate username- password pair during the data exchange.

The level of confidence that the client can have about the identity of the server after the completion of the key exchange protocol depends on the quality of the *certificate* that the server uses. Essentially, a certificate is a bundle of data about its owner. Its main role is to bind the owner's public key and its name together. Other relevant information is included, for example, the expiration date of the certificate and the issuer's name. The binding is implemented via digital signatures. Specifically, the authenticity of a certificate is asserted by its issuer by having the latter sign it. A client who is in possession of a server's certificate can check whether the certificate is trustworthy by verifying the accompanying digital signature under the public key of the issuer, thus creating a chain of trust: the client who starts out trusting the authenticity of the issuer's public key can now trust the authenticity of the server's public key.

Therefore, the certificate of an entity is only as trustworthy as the certificate of its issuer. Two important consequences of this trust dependency are the following.

- Once the secret key corresponding to the public key contained in the certificate of the issuer is

exposed, none of the certificates signed by the issuer after the exposure can be trusted.

– Care must be taken when a *self-signed certificate* is used. A self-signed certificate is one for which the issuer and the certificate owner are the same entity. Hence, in effect, a self-signed certificate that asserts that a particular public key *pk* truly belongs to an entity *A* says that we should believe that *A* owns *pk* simply because *A* says so. Clearly, asking for an entity to vouch for its own trusthworthiness is in general not a good idea.

  We remark that scenarios in which self-signed certificates are useful exist. (For example, an administrator in an enterprise network can manually install the self-signed certificate of a server in the enterprise on the employees' computers so as to allow client programs to be able to verify the authenticity of the certificate.) Nonetheless, in general, self- signed certificates should be employed carefully and minimally or be avoided altogether.

We emphasize that trusting that a public key belongs to an entity simply means that we believe that the owner of the public key knows the secret key corresponding to the public key. In a system in which a break-in has not occurred, this means that the *only* entity that knows the secret key should be the owner of the matching public key. In contrast, in the event of a breach, the assertion that the public key truly belongs to its owner becomes beside the point because an adversary may now also have the secret key. The information advantage that previously had distinguished the legitimate owner of the public key from the adversary has vanished.

PROTECTING WEB COMMUNICATION VIA SSL/TLS. The Transport Layer Security (TLS) protocol is the successor of the Secure Socket Layer (SSL) protocol. Most web servers that support secure communication (that is, in simple terms, ones that allow clients to connect to them with the prefix https://...) support both protocols. We do not distinguish between the two in our discussion in this paper and simply refer to the SSL and the TLS protocols collectively as SSL/TLS.

Consider the interaction between a client and a server using the key-then-data-exchange approach discussed above. When the interaction is performed via the SSL/TLS protocol, the key exchange part corresponds to the *handshake protocol* while the data exchange part corresponds to the *record protocol*. As in any real implementation of a cryptographic protocol, there are many tasks to be performed other than the main ones that the protocol is designed to accomplish. For example, in this case, the main tasks are key exchange and data exchange, but SSL/TLS must also allow the participants to negotiate which cryptographic algorithms and protocols (and which of the available versions) they would like to use for the key negotiation (e.g. Diffie-Hellman, Elliptic Curve Diffie-Hellman, etc.) and data exchange (AES CBC, AES GCM, etc.).

3. The Heartbleed Attack

There are many implementations of SSL/TLS. One of the most popular implementation is the open source library called OpenSSL [22]. The Heartbleed breach is due to a bug, which we will refer to simply as the Heartbleed bug, in widely-adopted versions (namely, versions 1.0.1 through 1.0.2beta) of this library [23].

THE CAUSE. The Heartbleed bug was borne out of the need to prevent the connection between a client and a server from getting prematurely torn down during a session. Although SSL/TLS operates over the Transmission Control Protocol (TCP), which is connection-oriented, and thus needs not be concerned with this problem, the Datagram Transport Layer Security (DTLS) protocol, whose goal is to achieve similar security guarantees as SSL/TLS over datagram protocols, does. In response to this need, the *Heartbeat Extension* was proposed in RFC 6520 as a protocol for keeping connections alive for both DTLS and TLS [18]. As it happened, in an attempt to check for the

"heartbeats" of the participants during the session so as to keep the current connection alive, an OpenSSL developer inadvertently introduced the Heartbleed bug [17].

THE HEARTBLEED BUG. Suppose a client sends a server a Heartbeat Request and expects a Heartbeat Response to be returned. RFC 6520 describes what must happen.

> When a HeartbeatRequest message is received and sending a HeartbeatResponse is not prohibited as described elsewhere in this document, the receiver MUST send a corresponding HeartbeatResponse message carrying an exact copy of the payload of the received HeartbeatRequest.

In a normal situation, the client would send the server a payload (e.g. a string "hello") and the corresponding size (e.g. 5 bytes). (A fixed-size, random padding is also sent, but this padding is inconsequential with respect to the Heartbleed bug.) In an attack, however, the adversary sends a Heart-beatRequest that contains a small payload along with a purported size that is larger than the actual size of the payload. This attack works because the code that deals with the HeartbeatRequest simply trusts that the purported size is correct and du- tifully copies and returns the data in its memory, starting at the pointer to the received payload, for the amount specified by the purported size which can be as large as 64K bytes [18]. Thus, when an attacker sends a small payload and a large purported size, it gets back not only the payload it has sent but also the data that reside in the server's memory immediately after the payload ends, for the number of bytes specified by the size parameter. It is the extraneous data returned here that is the crux of the vulnerability. For example, it has been demonstrated that the targeted server's long-term secret key can be obtained through this attack [21].

Not surprisingly, attacks exploiting the Heartbleed bug are effective against both servers and clients. Some have termed a Heartbleed attack against clients *Reverse Heartbleed* [2]. In particular, an attacker can set up a malicious server and trick a user to establish an SSL/TLS connection to it. Once the connection is established, the server can send a malicious Heartbeat-Request to the client and extract a portion of the client's memory contents. In effect, this variation of the Heartbleed attack adds power to garden-variety phishing scams.

Although Reverse Heartbleed is a simple variation of Heartbleed, its attack surface is much larger than that of Heartbleed for many reasons. First, clients can run on many platforms, ranging from home computers and mobile devices to embedded systems. This means that patching clients is much more challenging compared to patching servers. Second, client systems are often less well-maintained, and maintenance is often done by end users. This means that vulnerabilities may be undetected or neglected for years. Considering the prevalent use of computing devices in this day and age, Reverse Heartbleed may end up doing more damage over a longer period of time than Heartbleed itself.

4. Repercussions of Heartbleed

Once an adversary is able to get a portion of the memory contents of the target, the amount and the kind of damage it can inflict can be large and varied. Mitigation and prevention depend on what kind of information the adversary has obtained from the memory.

A LONG-TERM SECRET KEY IS STOLEN FROM MEMORY. One of the most feared situations is that adversary A has obtained the server's long-term secret key sk_s from the server's memory. Clearly, any server that has been afflicted by the Heartbleed bug must, at the very least, change its longterm secret key. In this section, we discuss additional problems and approaches to mitigation that also need to take place.

Breaking KE. The long-term secret key is used in the key exchange protocol, in which the server's identity

is authenticated and a session key K is established. If A has captured the protocol flows during the key exchange process, then an adversary may be able to use sk_s to obtain K. Armed with K, the adversary can decrypt any ciphertext that it has captured in the past for this session. A cryptographic tool that, if it had been used from the beginning, could have prevented A from obtaining K is called a *forward-secure key exchange protocol*. This type of protocol is described in Section 5.1.

Forging certificates. Once armed with sk_s, the adversary A can sign anything it would like to on behalf of the server. Consequently, any signature purported to be that of the server should no longer be trusted as having been generated by the server. Unfortunately, this includes any certificate that the server has *already* issued. Therefore, any certificate in the chain downstream from that issued by the server whose secret key has been compromised must be *revoked*, an undesirable process that incurs a large overhead. A cryptographic tool that could have eliminated the need for certificate revocation is a *forward-secure signature scheme.* This type of scheme is described in Section 5.2.

Forging signatures on documents. The authenticity of documents that the server has signed so far using the compromised sk_s can no longer be trusted. As with certificates, a tool to address this problem is a forward-secure signature scheme.

We should note that although the problems mentioned throughout this section focus on what happens to servers, many are also applicable to clients. It bears repeating that even users that do not run servers may be affected by the Heartbleed bug. Through a Reverse Heartbleed attack, a user who has been tricked into making a SSL/TLS connection to a malicious server mounting the attack could end up with his or her long-term secret key stolen. Any application that uses this compromised secret key would be affected. For example, if the secret key is also used for signing digital documents, all previously generated signatures would no longer be trustworthy. Forward- secure signatures can help address this particular problem.

CREDENTIALS ARE STOLEN FROM MEMORY. If an adversary can obtain certain credentials directly from memory, the damage depends on how the credentials are to be used. We discuss the two most common types of credentials here.

Username and password. Although this information allows the adversary to log in as a legitimate user to the targeted services, in practice the damage resulting from the exposure of a user's password is often not limited to only the services currently under attack. The reason is that many users reuse their passwords for many different services, consequently rendering those services vulnerable also. A cryptographic tool that could have helped prevent this is *password-based authenticated key exchange* described in Section 5.4.

Credit card number and other info. If an adversary can get all of the information necessary to charge a credit card in an online transaction (in general, this includes the credit card number, the last three digits of the sequence of numbers on the back of the card, and the expiration date), then it can charge any purchases to the card at will, until the card is cancelled. A cryptographic tool that could have helped prevent this is *limited-use credit card numbers*. Such numbers are described in Section 5.5.

A PSEUDORANDOM NUMBER GENERATOR SEED IS STOLEN FROM MEMORY. Most programs that implement secure functionality need to use randomness. One of the most common ways to programmatically generate randomness is to use a pseudorandom bit generator (PRG). This primitive requires that a *seed*, a short sequence of random bits, is given as an input so that a longer sequence of pseudorandom bits can be *deterministically* computed and output. If the output is computed deterministically without using any secrets (such as hidden state or a secret key), then anyone in possession of the right seed can easily compute the output.

If the stolen seed had been used to generate a session

key, then the adversary can use the seed to compute the session key then decrypt any ciphertext it has collected for this session. A cryptographic tool that could have addressed this is a *forward- secure pseudorandom bit generator*. Such generators are described in Section 5.3.

A SESSION TICKET IS STOLEN FROM MEMORY. A *session ticket key* is used to protect a *session ticket* containing state information about the current connection so that the server can resume a SSL/TLS session without performing the full handshake, thus reducing the server load. If a session ticket key is stolen, then an adversary can (1) decrypt previously-issued session tickets and (2) generate new session tickets. For the first threat, since session tickets contain state information about a session, the potential damage depends on what the server decides to include in a ticket. The second threat, however, is unlikely to be much of an issue since session ticket keys are often freshly generated at server reboots.

Clearly, there are other types of information that, once stolen from memory, can cause damage to the victim. We only consider the ones mentioned above since they have the most damaging repercussions.

A CAVEAT. Although there are many types of sensitive data that, once stolen, can lead to extensive damage as discussed above, we emphasize here that, in general, it is not a simple matter for an attacker to successfully pick and choose the type of data to steal at will. In fact, when the Heart- bleed bug was first discovered, the initial impression among security experts was that a server's long-term secret key could not be stolen through Heartbleed, although, as it happened, this impression was quickly proven to be false [20]. Given the level of sophistication required of an adversary to ensure that the desired data end up residing in the appropriate region of the memory in order to mount the attack, it would be arguably much simpler and more fruitful for an attacker to instead resort to social engineering attacks such as phishing.

5. Prevention through Cryptography

In this section, we discuss what could have been: what kinds of damage could be mitigated if certain types of cryptosystems had been deployed. Although it is no secret that these cryptosystems exist and that they could help tremendously in the event of secret exposure such as the Heartbleed attack, the fact, unfortunately, is that most systems do not deploy these cryptosystems.

Also, as seen in the previous section, many of the cryptographic tools we mention are forward-secure primitives. In terms of exposure-resilient cryptographic tools, we limit the scope of this paper to these primitives for brevity and simplicity. However, we point out here that forward security is not the only technique that can deal with exposure of secrets. Other tools include key-insulated cryptosystems [14], intrusion-resilient cryptosystems, threshold cryptosystems [11, 12], and proactive cryptosystems [15]. The first two groups require an additional computational device to achieve some weaker forms of security *before and after* the secret exposure, rather than only *before* the exposure as is the case with forward security. The last two groups require that multiple (usually more than two) parties work closely together when carrying out a task. These tools are also valid alternatives for dealing with Heartbleed. They are, however, likely to be more complicated to set up in practice compared to forward-secure cryptosystems since they require additional coordination between a server and a helper device or between multiple servers.

5.1 Forward-secure key exchange

The helpful guanrantee with forward-secure key exchange is that an adversary who obtains the server's long-term secret key at time t still would not know any session key that was generated before time t.

The most popular KE protocol for SSL/TLS among server system administrators is the RSA-based KE protocol. In this protocol, the client chooses a value for the session key K, encrypts K with the server's public key pk, then

sends the result to the server. Upon receiving this result, the server decrypts it using the long-term secret key *sk* to obtain *K*. Consequently, RSA-based KE protocol does not offer forward security: if the long-term secret key *sk* becomes exposed at some point, an adversary who has captured the data exchanged between the client and the server in the past can use *sk* to decrypt the appropriate segment of the protocol flows to obtain *K* and can in turn use *K* to decrypt the data encrypted with *K*.

In contrast, the KE protocol implemented for OpenSSL that is forward secure is the *Diffie-Hellman Ephemeral* (DHE) protocol [13]. Unfortunately, this protocol is not popular among system administrators. The most commonly cited reason is the claim that it is too computationally intensive. DHE is based on the basic Diffie-Hellman key exchange protocol shown in Fig. 1. The session key obtained at the end of the protocol is *K*.

The basic protocol shown in Fig. 1 does not keep adversary A from pretending to be the client or the server. For example, A can pretend to be a server "S" by simply engaging in the protocol exchanges with the client using "S" as its name. *Digital signatures* is used to address this problem: the server signs its protocol flow using its long-term secret key; the client then verifies, using the server's public key, that the protocol flow it receives has indeed been generated by the server.

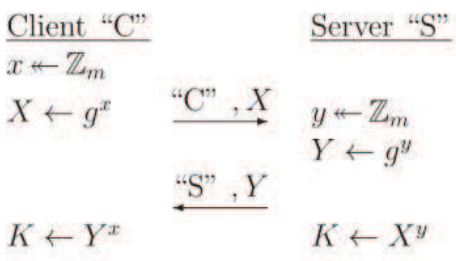


Fig. 1. The basic Diffie-Hellman key exchange. The cyclic group G generated by g is of order m. We make G, g, and m public. The notation s $\leftarrow\!\!\!\!\leftarrow$ S means the value assigned to s is chosen uniform randomly from the set S. An arrow $\leftarrow$ denotes an assignment.

5.2 Forward-secure digital signatures

As previously discussed, when a long-term secret key *sk* is exposed, the authenticity of all signatures purportedly generated using *sk* can no longer be trusted. This includes all certificates signed by the owner of *sk*. They must now be revoked. This problem can be addressed via forward-secure digital signatures.

In a forward-secure digital signature scheme [3], time is divided into periods, e.g. months, days, or weeks. The forward security guarantee is that, despite a long- term secret key exposure at time period *t*, signatures generated before *t* can still be trusted while those generated during and after t cannot be. The crux lies in the deterministic *key update* algorithm. Suppose that initially the server's secret and public keys are *sk* and *pk*, respectively. At each time period, *sk* gets updated while *pk* remains fixed. Since *pk* is unchanged, anyone can verify signatures using the single value of *pk* regardless of which time period the signature was generated. The secret key update algorithm is designed to be easily computed going forward (e.g. from time period *t* to *t* + 1) but difficult to go backward (e.g. from *t* + 1 to *t*). Consequently, if adversary *A* obtains sk_t, it can generate signatures on behalf of the server for time periods after *t* but not before (assuming that the secret keys for the time periods before *t* have been properly erased). Thus, certificates that have been issued (i.e. signed) before t remain trustworthy, and revocation can be avoided.

5.3 Forward-secure pseudorandom bit generator

Originally proposed by Bellare and Yee [5], a forward-secure pseudorandom bit generator (FS PRG) takes a state and returns the next state and the output. The way it is used is the following. The initial state is taken to be the original random seed. When a pseudorandom bits is needed, one invokes the PRG to update the seed and to obtain the pseudorandom bits to be used. The security guarantee is that, if adversary *A* obtains the current state s, it still would not be able to distinguish pseudorandom bitstrings that

have been output prior to the exposure of the seed from outputs of a random function. This implies that, at the very least, *A* must not be able to obtain the states in the time periods prior to the exposure.

In a Heartbleed attack, if an adversary *A* obtains the current seed that is used by other cryptographic algorithms, for example to generate the session key, it can of course compromise the security of the current session. But if an FS PRG is used, *A* would not be able to derive the session keys for time periods prior to the break-in, thus leaving the security of these sessions intact.

5.4 Password-Based Authenticated Key Exchange

As discussed, since most clients do not have certificates, the most common authentication mechanism often involves the user sending his or her username and password to the server via SSL/TLS. In a Heartbleed attack, if adversary A obtains the username and password of a user from the server's memory, the user has no recourse other than to change the password.

If a *password-based authenticated key exchange* (PAKE) protocol is used, the user would not need to send the username and password over to the server and yet be able to establish a secret session key. In a PAKE protocol, the server and the user initially share a secret password *pw*, perhaps through a registration protocol or through out-of-band communication. Then, after the protocol completes, the user and the server end up with a secret session key. Many PAKE protocols have been proposed over the years. See for example [1, 4, 7–10].

5.5 Limited-use credit card numbers

A credit card number is a valuable piece of information. One can make purchases by giving a store a credit card number along with other accompanying information such as the appropriate expiration date and a "card security code" or a "card verification code," a 3-digit code found on the actual credit card itself. In an online purchase, all these pieces of information are sent to the server of the merchant. If the server is under a Heartbleed attack at the time the transaction occurs, an adversary can obtain this information from the server's memory.

Efforts have been made to limit the damage caused by credit card number exposure by limiting how long or how often a single credit card number can be used. These credit card numbers are sometimes called *disposable credit cards*. There are many approaches to implement this concept [16, 19, 24]. We discuss one simple example here. Rubin and Wright [16] propose that a user and his or her card issuer share a secret key *K* and use it to *authenticate and encrypt* the credit card number along with the rest of the authorizing information and restrictions regarding the current purchase. The resulting ciphertext *C* can be used in place of the credit card number during purchases.

We emphasize that in this case the information needs to be both authenticated and encrypted. Secrecy is necessary because the card number and other information must be kept secret. Authenticity is necessary because *C* is used as a token, and a token that can be minted by anyone, including in particular an adversary, is not very useful.

Furthermore, a scheme such as this needs a way to prevent a *replay* attack in which an adversary can simply capture the token *C* and simply reuse it to make other purchases. Including timestamps and other purchase-related information into the payload to be authenticated and encrypted can address this problem. Rubin and Wright further discuss this issue in [16].

We note here that, just like any other technical solution to real-world problems, there are usability issues associated with disposable credit cards. Consequently, more than a decade after their conception, they are still not prevalent.

6. Conclusion

Over the years, secret exposures have become frequent to a point where we should consider them to be common occurrences rather than rare events. Mechanisms that can mitigate secret exposures are of more importance now than

ever. Cryptographers must forge ahead and come up with practical and efficient methods to deal with secret leakage. Practitioners must consider proposals that may at first glance seem esoteric and give security the high priority it deserves.

References

1. M. Abdalla and D. Pointcheval. Simple password- based encrypted key exchange protocols. In A. Menezes, editor, CT-RSA 2005, volume 3376 of LNCS, pages 191–208. Springer, Feb. 2005.
2. BBA, Inc. Testing for reverse heartbleed. http://blog.meldium.com/home/2014/4/10/ testing-for-reverse-heartbleed, Apr. 10, 2014.
3. M. Bellare and S. K. Miner. A forward-secure digital signature scheme. In M. J. Wiener, editor, CRYPTO'99, volume 1666 of LNCS, pages 431–448. Springer, Aug. 1999.
4. M. Bellare, D. Pointcheval, and P. Rogaway. Authenticated key exchange secure against dictionary attacks. In B. Preneel, editor, EUROCRYPT 2000, volume 1807 of LNCS, pages 139–155. Springer, May 2000.
5. M. Bellare and B. S. Yee. Forward-security in private-key cryptography. In M. Joye, editor, CT- RSA 2003, volume 2612 of LNCS, pages 1–18. Springer, Apr. 2003.
6. S. Bellovin. Problem areas for the ip security protocols. In Proceedings of the 6th USENIX Security Symposium 1996, pages 1–16, San Jose, CA, USA, July 22–25, 1996. USENIX Association.
7. S. M. Bellovin and M. Merritt. Encrypted key exchange: Password-based protocols secure against dictionary attacks. In 1992 IEEE Symposium on Security and Privacy, pages 72–84. IEEE Com- puter Society Press, May 1992.
8. V. Boyko, P. D. MacKenzie, and S. Patel. Provably secure password-authenticated key exchange using Diffie-Hellman. In B. Preneel, editor, EURO- CRYPT 2000, volume 1807 of LNCS, pages 156–171. Springer, May 2000.
9. E. Bresson, O. Chevassut, and D. Pointcheval. Security proofs for an efficient password-based key exchange. In S. Jajodia, V. Atluri, and T. Jaeger, editors, ACM CCS 03, pages 241–250. ACM Press, Oct. 2003.
10. E. Bresson, O. Chevassut, and D. Pointcheval. New security results on encrypted key exchange. In F. Bao, R. Deng, and J. Zhou, editors, PKC 2004, volume 2947 of LNCS, pages 145–158. Springer, Mar. 2004.
11. A. De Santis, Y. Desmedt, Y. Frankel, and M. Yung. How to share a function securely. In 26th ACM STOC, pages 522–533. ACM Press, May1994.
12. Y. Desmedt and Y. Frankel. Threshold cryptosystems. In G. Brassard, editor, CRYPTO'89, volume 435 of LNCS, pages 307–315. Springer, Aug. 1990.
13. T. Dierks and C. Allen. RFC 2246 - The TLS Protocol Version 1.0. Internet Activities Board, Jan. 1999.
14. Y. Dodis, J. Katz, S. Xu, and M. Yung. Key-insulated public key cryptosystems. In L. R. Knud- sen, editor, EUROCRYPT 2002, volume 2332 of LNCS, pages 65–82. Springer, Apr. / May 2002.
15. R. Ostrovsky and M. Yung. How to withstand mobile virus attacks. In 10th ACM PODC, pages 51–59. ACM Press, Aug. 1991.
16. A. D. Rubin and R. N. Wright. Off-line generation of limited-use credit card numbers. In P. F. Syverson, editor, FC 2001, volume 2339 of LNCS, pages 196–209. Springer, Feb. 2001.
17. R. Seggelmann. Git commit diff. http://git.openssl.org/gitweb/?p=openssl.git;a=commitdiff;h=4817504, Jan. 1 2012.
18. R. Seggelmann, M. Tuexen, and M. G. Williams. Transport layer security (TLS) and datagram transport layer security (DTLS) heartbeat extension. http://tools.ietf.org/html/rfc6520, Feb. 2012.
19. A. Shamir. Secureclick: A Web payment system with disposable credit card numbers. In P. F. Syverson,

editor, FC 2001, volume 2339 of LNCS, pages 232–242. Springer, Feb. 2001.

20. N. Sullivan. Answering the critical question: Can you get private ssl keys using heartbleed? http://blog.cloudflare.com/answering-the-critical-question-can-you-get-private-ssl- keys-using-heartbleed, Apr. 11, 2014.
21. N. Sullivan. The results of the cloudflare challenge. http://blog.cloudflare.com/ the-results-of-the-cloudflare-challenge, Apr. 11, 2014.
22. The OpenSSL Project. OpenSSL: Cryptography and SSL/TLS toolkit. http://www.openssl.org.
23. The OpenSSL Project. TLS heartbeat read overrun (CVE-2014-0160). http://www.openssl.org/news/secadv_20140407.txt, Apr. 07, 2014.
24. M. Trombly. American express offers disposable credit card numbers for online shopping. http://www.computerworld.com/s/article/49788/American_Express_offers_disposable_ credit_card_numbers_for_online_shopping, Sept. 7, 2000.

การบริหารจัดการขยะในระดับท้องถิ่น: กรณีศึกษา เทศบาลนครภูเก็ต

Local Authority Waste Management: Case study of Phuket Municipality

มณฑลี ศาสนนันทน์

Montalee Sasananan

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Prathumthani

บทคัดย่อ

ขยะเป็นปัญหาสำคัญในทุกท้องถิ่น ที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ทุกคนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยทั่วไปสังคมเมืองและสังคมบริโภคนิยม จะมีการทิ้งขยะมากกว่าสังคมชนบทหรือสังคมที่มีการพึ่งพาตนเองสูง บทความวิชาการนี้นำเสนอปัญหาและรูปแบบการจัดการขยะของเทศบาลนครภูเก็ต ซึ่งเป็นเมืองท่องเที่ยวที่ได้รับการยอมรับว่ามีการจัดการขยะดีที่สุดแห่งหนึ่งในประเทศไทย และสามารถใช้เป็นต้นแบบให้กับจังหวัดอื่นได้ หลังจากที่ภูเก็ตประสบปัญหาขยะล้นเมืองนั้น แนวทางการแก้ปัญหาที่เทศบาลนครภูเก็ตใช้คือ การกำจัดขยะแบบผสมผสาน ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การลดปริมาณที่แหล่งกำเนิด (source reduction) การนำกลับมาใช้ใหม่ (recycling) การแปลงรูปของเสีย (waste transformation) และการฝังกลบ (land filling) ในด้านการแปลงรูปของเสียด้วยการเผานั้น จังหวัดภูเก็ตถือเป็นแห่งแรกในประเทศไทยที่ใช้วิธีการร่วมลงทุนระหว่างภาครัฐและภาคเอกชน (Public Private Partnership, PPP) โดยกระทำในลักษณะให้เอกชนลงทุนก่อสร้างและบริหาร (Build-Own-Operate-Transfer, BOOT) โครงการนี้ให้สิทธิภาคเอกชนในการบริหารจัดการโรงเตาเผาขยะเป็นเวลา 14 ปี 7 เดือน วงเงินลงทุนรวมไม่เกิน 1000 ล้านบาท เอกชนจะมีรายได้จากค่ากำจัดขยะและการจำหน่ายไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้ความร้อนที่ได้จากการเผาขยะไปผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานทดแทน โครงการในลักษณะนี้เป็นการเพิ่มบทบาทให้หน่วยงานเอกชนเข้ามามีส่วนร่วมกับรัฐบาล ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และลดข้อจำกัดด้านงบประมาณการลงทุน ภายใต้เงื่อนไขการกำกับดูแลที่เหมาะสม

คำสำคัญ : การจัดการขยะแบบผสมผสาน เทศบาลนครภูเก็ต การร่วมลงทุนระหว่างภาครัฐและภาคเอกชน

Abstract

Waste is an important problem in all local areas affecting everyone. In general, urban society and consumerism society tend to generate greater amount of waste than self-reliant rural society. This article presents waste problems and waste management of Phuket municipal authority which is recognized as one of the best waste management authority in Thailand. The case study can be used as an example for other provinces. After Phuket faced the problem of excessive wastes, the municipal authority employed an integrated waste management system consisting of 4 steps: source reduction, recycling, waste transformation, and land filling. In terms of waste transformation by combustion, Phuket is regarded as the first province in Thailand which employs a public private partnership (PPP) scheme. It uses the Build-Own-Operate-Transfer (BOOT) system which gives a private company the right to manage the incineration plant for 14 years and 7 months within a budget not exceeding 1000 million baht. The company will earn its income through waste treatment fee and selling electricity to the Provincial Electricity Authority. The heat generated from incineration is used to generate electricity. This type of scheme gives chance to private sector to participate in a government project. It should help to enhance project efficiency and overcome the problem of government budget limitation.

Keywords: Integrated solid waste management, Phuket Municipal Authority, Public Private Partnership (PPP)

1. บทนำ

จังหวัดภูเก็ตเป็นจังหวัดท่องเที่ยวที่มีชื่อเสียงในระดับโลก การขยายตัวของเมืองและอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวตลอดจนการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคของประชาชนทำให้ปริมาณขยะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในระหว่าง ปีพ.ศ. 2546 – 2555 จังหวัดภูเก็ตประสบปัญหาขยะล้นเมือง ปริมาณขยะมูลฝอยที่ต้องกำจัดมีมากกว่าขีดความสามารถในการรองรับของระบบกำจัดขยะ นอกจากนั้นทางจังหวัดยังขาดการการสนับสนุนอย่างพอเพียงจากรัฐบาลในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบกำจัดขยะ ปัญหาดังกล่าวเข้าขั้นวิกฤติจนเกิดเหตุการณ์ที่น้ำชะขยะจากบ่อฝังกลบไหลลงสู่ทะเล สร้างความเสียหายต่อชุมชนใกล้เคียง ทำให้ปลาในกระชังที่ชาวบ้านเลี้ยงไว้ตายจนหมด และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

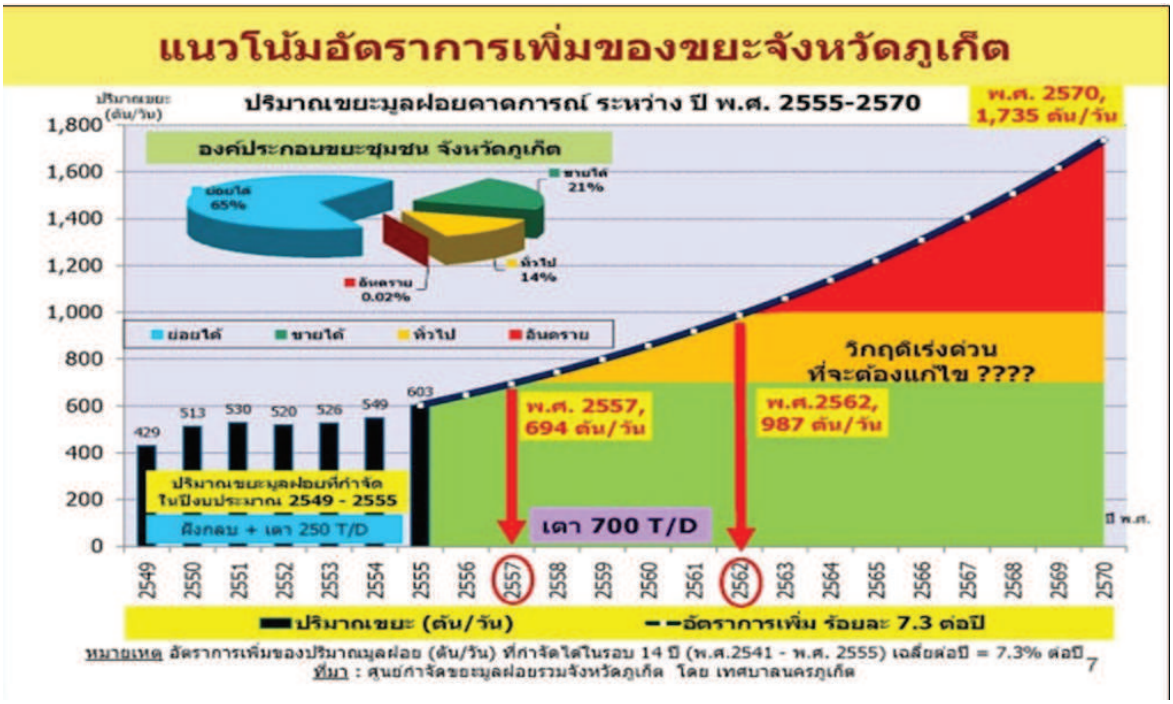
ตารางที่ 1 แสดงอัตราการเกิดขยะมูลฝอยเฉลี่ยในจังหวัดภูเก็ต ในปี พ.ศ. 2549 ถึง พ.ศ. 2556 จากตารางดังกล่าวจะเห็นว่าปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มสูงขึ้นทุกปี โดยในปี 2556 มีมากถึง 661ตัน/วัน และเมื่อพิจารณาอัตราการเกิดขยะต่อหัวพบว่าอัตราการเกิดขยะมูลฝอยก็สูงขึ้นโดยลำดับเช่นเดียวกัน โดยในปี 2556 อัตราการเกิดมูลฝอยเฉลี่ยต่อคนต่อวันมีค่า 1.79 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน อัตรานี้สูงกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศไทย คือ 1.03 กก./คน/วัน และสูงกว่าค่าเฉลี่ยอัตราการทิ้งขยะของชาวญี่ปุ่น (1 กก./คน/วัน) แต่ต่ำกว่าสังคมอเมริกันซึ่งทิ้งขยะโดยเฉลี่ยวันละ 2 กก/คน (คมชัดลึก 2557) เนื่องจากสังคมอเมริกาเป็นสังคมบริโภคนิยมและมีพฤติกรรมการใช้จ่ายฟุ่มเฟือย ทั้งนี้กล่าวได้ว่าปริมาณการทิ้งขยะมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการบริโภคของมนุษย์

รูปที่ 1 แสดงแนวโน้มของอัตราการเพิ่มของขยะในจังหวัดภูเก็ต ซึ่งรวบรวมโดยศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยจังหวัดภูเก็ต เทศบาลนครภูเก็ต จากภาพด้านบนจะเห็นว่าทางเทศบาลได้แยกองค์ประกอบของขยะชุมชนออกเป็น 4 ส่วน ตามสภาพการณ์จัดการขยะของเทศบาลที่เกิดขึ้นจริง ได้แก่ ขยะย่อยได้ ขยะขายได้ ขยะอันตราย และขยะทั่วไป จากการเก็บข้อมูลเฉลี่ยในช่วงปีพ.ศ. 2549-2556 พบว่าขยะย่อยได้ (หมายถึงขยะอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้) มีสัดส่วนมากที่สุดคือ 65 % ส่วนขยะขายได้ หมายถึง ขยะที่มูลค่าในด้านการรีไซเคิล เช่น กระป๋อง กระดาษ ขวดพลาสติก เป็นต้น ขยะประเภทนี้มีสัดส่วนรองลงมา คือ 21% ในทางปฏิบัติจริงขยะประเภทนี้มักถูกเก็บไปขายโดยซาเล้งหรือผู้ค้าขยะรายย่อย จึงไม่เกิดภาระแก่เทศบาลในการคัดแยก ส่วนขยะอันตรายมีอยู่ประมาณ 0.02 % เป็นขยะที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แบตเตอรี ขยะประเภทนี้จำเป็นต้องได้รับการกำจัดอย่างถูกวิธีเพื่อไม่ให้เกิดอันตราย

ตารางที่ 1 อัตราการเกิดมูลฝอยเฉลี่ยของจังหวัดภูเก็ต

ปี พ.ศ.	ปริมาณมูลฝอยทั้งหมด (ตัน/วัน)	จำนวนประชากร ตามทะเบียนราษฎร์ (คน)	อัตราการเกิดมูลฝอย (กก./คน/วัน)
2549	429	300,737	1.43
2550	513	315,498	1.63
2551	530	327,006	1.62
2552	520	335,913	1.55
2553	526	345,067	1.52
2554	549	353,847	1.55
2555	603	358,819	1.68
2556	661	369,522	1.79
เฉลี่ย			1.60

ที่มา ข้อมูลจำนวนประชากรตามทะเบียนราษฎร์ กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย



รูปที่ 1 การคาดการณ์ปริมาณขยะมูลฝอย จังหวัดภูเก็ต ระหว่างปี พ.ศ. 2555 – 2570
(ที่มา สมใจ สุวรรณศุภพนา และคณะ, 2557, น 34)

ต่อสิ่งแวดล้อม

จากรูปจะเห็นว่าการเกิดขึ้นของขยะมูลฝอยมีปริมาณสูงขึ้นทุกปี และมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่วิกฤติในอนาคตอันใกล้ ในปี พ.ศ. 2557 มีการคาดการณ์ไว้ที่ 694 ตันต่อวัน เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มของขยะในเกาะภูเก็ตในรอบ 9 ปีที่ผ่านมา อัตราการเกิดขยะมูลฝอยโดยเฉลี่ยมีค่าสูงถึงร้อยละ 7.3 ต่อปี อัตราดังกล่าวถือว่าสูงมากเมื่อพิจารณาจากจำนวนประชากรตามทะเบียนราษฎร์ เนื่องจากผู้ก่อให้เกิดขยะประกอบด้วยประชากรหลายส่วน ได้แก่ประชากรตามทะเบียนราษฎร์ ประชากรแฝงและนักท่องเที่ยว และเป็นการยากที่จะประเมินประชากรแฝงและนักท่องเที่ยวได้อย่างแม่นยำ

จากปัญหาขยะล้นเมืองดังกล่าว ก่อให้เกิดความร่วมมือระหว่างเทศบาลนครภูเก็ตกับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่นๆในจังหวัด โดยมีการจัดตั้งคณะกรรมการบริหารจัดการขยะมูลฝอย และกำหนดรูปแบบการจัดการขยะแบบผสมผสานที่มีทั้งการลด คัดแยก และใช้ประโยชน์จากขยะ ณ แหล่งกำเนิด ในการจัดการขยะนั้นทุกองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นจะต้องร่วมรับผิดชอบค่ากำจัดขยะ ส่งเสริมการลด คัดแยก และนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ โดยอาศัยการมีส่วนร่วมของเครือข่ายภาครัฐ เอกชน และภาคประชาสังคม นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการกำจัดและเพิ่มมูลค่าของขยะ โดยมีการเก็บคืนพลังงานและการแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

3. รูปแบบการจัดการขยะแบบผสมผสาน

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency; U.S. EPA) ได้นำเสนอวิธีการจัดการของเสียแบบผสมผสาน (Integrated Solid Waste Management; ISWM) โดยประกอบด้วย 4 ขั้นตอน เรียงลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยดังนี้ การลดปริมาณที่แหล่งกำเนิด (source reduction) การนำกลับมาใช้ใหม่ (recycling) การเผาของเสีย (waste combustion) และการฝังกลบ (land filling) อย่างไรก็ตามเพื่อให้ครอบคลุมการจัดการมูลฝอยได้มากขึ้น Tchonanoglous (1993) ได้ใช้คำว่า การแปลงรูปของเสีย (waste transformation) แทนคำว่า การเผาของเสีย (waste combustion) เนื่องจากคำว่าการเผาให้ความหมายที่แคบกว่า

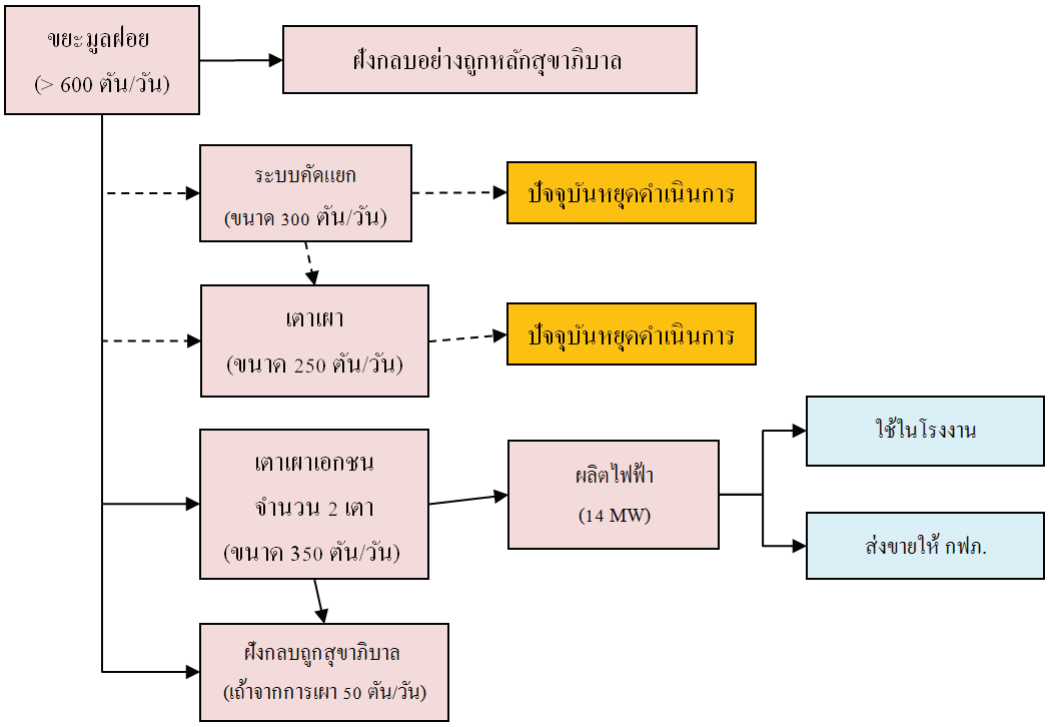
สำหรับเทศบาลนครภูเก็ตนั้น รูปแบบการจัดการขยะแบบผสมผสาน เริ่มจากการรณรงค์ให้ชุมชนและผู้ประกอบการลดปริมาณขยะที่แหล่งกำเนิด ผ่านทางเครือข่ายมูลนิธิเพื่อสิ่งแวดล้อมเมืองภูเก็ต เครือข่ายนี้ทำหน้าที่รณรงค์สร้างจิตสำนึกในการลด คัดแยก และนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ มีการรวบรวมปราชญ์ท้องถิ่น ภูมิปัญญาชาวบ้าน สร้างบุคลากรและแหล่งเรียนรู้สำหรับเป็นต้นแบบให้กับสถานประกอบการต่างๆในการลดและคัดแยกขยะ นอกจากนี้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) ทุกแห่งในจังหวัดยังส่งเสริมให้มีการจัดตั้งเครือข่ายอาสาสมัครพิทักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมหมู่บ้าน (ทสม.) เพื่อเป็นแกนนำในการให้ความรู้ความเข้าใจกับประชาชน นอกเหนือจากนี้อปท.ยังมีนโยบายจัดตั้งศูนย์คัดแยกขยะชุมชน มีการจัดรถเก็บขนขยะแยกประเภท และกำหนดวันเวลาการจัดเก็บขยะที่ชัดเจน รวมทั้งส่งเสริมการนำขยะมาทำน้ำหมักและปุ๋ยชีวภาพ มาตรการคัดแยกขยะเปียกออกจากขยะแห้งตั้งแต่ต้นทางเป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะขยะส่วนใหญ่ที่เข้ามาในระบบเป็นขยะอินทรีย์มากถึง 60 % รองลงมาเป็นขยะพลาสติก หากมีการคัดแยกขยะเปียกออกตั้งแต่ต้นทางจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา ช่วยลดปัญหาการเกิดไดออกซินเนื่องจากการเผาไหม้ไม่ได้อุณหภูมิสูงเพียงพอ นอกจากนี้การคัดแยกตั้งแต่ต้นทางยังช่วยให้เกิดการใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์อีกด้วย อย่างไรก็ตามในปัจจุบันโรงคัดแยกขยะซึ่งดำเนินการโดยเอกชนได้หยุดดำเนินการเนื่องจากประสบภาวะขาดทุน

สำหรับขยะอันตราย (เช่น แบตเตอรีจากโทรศัพท์มือถือ) ทางจังหวัดได้ส่งเสริมในหลายรูปแบบ เช่น มีโครงการขยะอันตรายแลกยา ภายใต้ความร่วมมือระหว่างเทศบาลกับชมรมร้านขายยาจังหวัดภูเก็ต โครงการนี้เกิดขึ้นในเดือนตุลาคม ปี 2553 ผู้บริโภคสามารถนำขยะอันตรายไปแลกยาสามัญประจำบ้านจากร้านขายยาที่เข้าร่วมโครงการ 14 ร้านในเขตเทศบาลนครภูเก็ต ขยะอันตรายที่ร้านยาได้รับมาจะถูกรวบรวมเพื่อนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีต่อไป (Phakakrong, 2011) มาตรการดังกล่าวช่วยสร้างจิตสำนึกและความตระหนักต่อความสำคัญของการกำจัดขยะอันตรายอย่างถูกวิธี นอกจากนี้องค์การบริหารส่วนจังหวัดภูเก็ต (อบจ.) ได้ส่งเสริมให้มีธุรกิจรับซื้อขยะรีไซเคิลที่คัดแยกจากบ้านเรือน และมีการดำเนินงานด้านการขนส่งขยะอันตรายเพื่อนำไปกำจัดที่ศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมอีกด้วย

สำหรับเทคโนโลยีการกำจัดขยะที่ปลายทางนั้น หลังจากการคัดแยกขยะและนำขยะเปียกไปทำเป็นปุ๋ยหมักแล้ว ขยะที่เหลือจะถูกนำไปเผาในเตาเผา เทศบาลนครภูเก็ตใช้แบบผสมผสานระหว่างระบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลและระบบเตาเผาขยะมูลฝอย ประวัติการก่อสร้างระบบเตาเผาขยะ มีความน่าสนใจและสมควรเป็นกรณีศึกษาเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2535 กรมโยธาธิการได้สนับสนุนงบประมาณในการก่อสร้างระบบกำจัดขยะแบบฝังกลบ ระบบเตาเผาขยะและระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อโรงเผาขยะขนาด 250 ตันก่อสร้างเสร็จในปี 2542 ได้มีการแต่งตั้งคณะกรรมการบริหารจัดการโรงงานเตาเผามูลฝอยเพื่อจัดหางบประมาณให้เพียงพอในการบริหารจัดการ นอกจากนี้ยังมีการของบจากรัฐบาลโดยท้องถิ่นสมทบร้อยละ 30 เป็นเวลา 2 ปี ในช่วงเวลานั้นปัญหาเรื่องขยะได้ถูกนำเสนอขึ้นเป็นวาระจังหวัด

ต่อมาในช่วงปี พ.ศ. 2545-2550 ภูเก็ตกลายเป็นเมืองท่องเที่ยวในระดับโลกและมีจำนวนนักท่องเที่ยวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผลที่ตามมาคือทางจังหวัดประสบปัญหาขยะล้นเมืองเนื่องจากมีขยะมูลฝอยเข้าระบบสูงเกินขีดความสามารถในการรองรับของเตาเผาขยะ เทศบาลจึงแก้ปัญหาด้วยการนำขยะบางส่วนไปยังบ่อฝังกลบที่ใช้งานมาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2536 บ่อดังกล่าวถูกใช้งานจนเต็มพื้นที่แล้ว จึงไม่สามารถทำการฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลได้อีก เมื่อฝนตกหนักจึงทำให้คันดินชำรุดและมีน้ำชะขยะไหลออกสู่ภายนอก วิกฤติการณ์นี้ส่งผลให้ปลาที่ชาวบ้านเลี้ยงไว้ในกระชังรอบบริเวณนั้นตายทั้งหมด และเทศบาลต้องชดใช้ค่าเสียหายที่เกิดขึ้น

ในปีพ.ศ. 2550 ทางจังหวัดได้รับงบประมาณจากรัฐบาลในการฟื้นฟูระบบฝังกลบในวงเงิน 52 ล้านบาท แต่ก็ช่วยแก้ไขปัญหาได้เพียง 2 ปีเท่านั้น เทศบาลจึงมีความประสงค์ที่จะก่อสร้างเตาเผาชุดที่สอง โดยของบอุดหนุนจากรัฐบาล แต่ไม่ได้รับการสนับสนุน เทศบาลนครภูเก็ตจึงว่าจ้างให้ศูนย์วิจัยการเผากากของเสีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ทำการศึกษาความเหมาะสมของระบบการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน จนได้ข้อเสนอแนะว่าควรใช้เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย โดยให้เอกชนลงทุน เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเตาเผาขยะมูลฝอยมีมูลค่าสูงเกินกว่าที่เทศบาลจะจัดหางบประมาณมาลงทุนได้



รูปที่ 2 ภาพรวมของการจัดการขยะมูลฝอย จังหวัดภูเก็ต
(ที่มา สมใจ สุวรรณศุภพนา และคณะ, 2557, น 48)

ผลสรุปคือทางเทศบาลได้ดำเนินการตามข้อเสนอแนะของที่ปรึกษา และได้มอบให้บริษัทพีเจที เทคโนโลยี เป็นเอกชนที่ได้รับสัญญาลงทุนก่อสร้าง และบริหารโรงเผาขยะมูลฝอย โดยเอกชนจะมีรายได้จากการนำพลังงานความร้อนจากขยะมาเป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า โครงการนี้มีกำหนดระยะเวลารับสัญญาลงทุนก่อสร้างและบริหาร 14 ปี การจัดการในรูปแบบดังกล่าวช่วยให้เทศบาลไม่ต้องรับภาระในการลงทุนและดำเนินงานซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงมาก (เฉพาะมูลค่าก่อสร้างนั้นสูงถึง 940,600,000 บาท) ส่วนผู้ลงทุนก็จะได้รับผลตอบแทนจากค่ากำจัดขยะ และค่าจำหน่ายกระแสไฟฟ้า โรงเผาขยะนี้ก่อสร้างแล้วเสร็จเมื่อวันที่ 20 มี.ค. 2555 โดยเป็นเตาเผาขยะชุมชนขนาด 359 ตัน 2 ชุด สามารถเผาขยะชุมชนได้ 700 ตันต่อวัน ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า 10 เมกะวัตต์ ในปัจจุบันได้เดินระบบเต็มประสิทธิภาพเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 2 แสดงภาพรวมของการจัดการขยะมูลฝอยของจังหวัดภูเก็ตในปัจจุบัน เทศบาลนครภูเก็ตจัดตั้งศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยโดยใช้ที่ดินป่าชายเลนเสื่อมโทรม มีพื้นที่กำจัดมูลฝอยแบบฝังกลบ 120 ไร่ แบบเตาเผา 46 ไร่ พื้นที่บำบัดน้ำเสีย 33 ไร่ และพื้นที่ฉนวน 76 ไร่ ในการกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีฝังกลบนั้นเทศบาลนครภูเก็ตดำเนินการด้วยตนเอง ส่วนโรงคัดแยกขยะมูลฝอย ขนาดพื้นที่ 8 ไร่นั้น บริษัทกำจรก่อสร้างจำกัดได้รับสัมปทานในการลงทุนก่อสร้างการคัดแยกขยะรีไซเคิล แต่ในปัจจุบันหยุดดำเนินงานเนื่องจากประสบภาวะขาดทุน ในปัจจุบันมีการคัดแยกขยะรีไซเคิล โดยมีบุคคลเข้ามาคัดแยกขยะจำนวน 110 คน และมีการลงทะเบียนกับทางเทศบาลฯ ไว้นอกจากนี้ยังมีการนำขยะเปียกไปผลิตน้ำหมักชีวภาพ และนำไปใช้ในการล้างตลาดและฉีดบริเวณสถานที่กำจัดขยะเพื่อลดกลิ่นเหม็น ทั้งยังมีการทำปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์อีกด้วย

สำหรับการกำจัดขยะด้วยเตาเผามีเอกชนเป็นผู้ดำเนินการ ทั้งนี้ระบบเตาเผาขยะมูลฝอย มีจำนวน 2 ชุด ชุดที่ 1 มีขนาด 250 ตันต่อวัน แต่ปิดดำเนินการแล้วเนื่องจากเสื่อมสภาพ ส่วนเตาเผาชุดที่ 2 ซึ่งเอกชนเป็นผู้ดำเนินการนั้นมีขนาด 359 ตันต่อวันต่อเตา และมีจำนวน 2 เตา

ทั้งนี้จังหวัดภูเก็ตถือเป็นจังหวัดแรกในประเทศไทยที่

สร้างโรงเตาเผาขยะโดยให้เอกชนมาลงทุน 100 % โครงการนี้ให้เอกชนลงทุนก่อสร้างและบริหาร (Build-Own-Operate-Transfer (BOOT) โดยให้สิทธิการบริหารจัดการโรงเตาเผาขยะเป็นเวลา 14 ปี 7 เดือน (หลังจากนั้นแล้วแต่การตกลงของทั้งสองฝ่าย) วงเงินลงทุนรวมไม่เกิน 1000 ล้านบาท ทั้งนี้เทศบาลจะชำระค่ากำจัดขยะให้แก่บริษัทในส่วนที่เกินจาก 130 ตันเป็นต้นไป ในอัตราตันละ 300 บาท เหตุผลที่โครงการดังกล่าวเกิดขึ้นได้จริงเพราะมีผู้ได้รับประโยชน์ทุกฝ่าย

เมื่อพิจารณาในมุมมองของเอกชน หากพิจารณาปริมาณขยะที่เข้ามาวันละ 700 ตัน ผลิตไฟฟ้าได้ 10 เมกะวัตต์ บริษัทสามารถทำรายได้ดังนี้

รายได้จากการกำจัดขยะ (700 ตัน/ วัน) (365 วัน/ปี) (300 บาท/ตัน) = 76,650,000 บาท/ปี

การผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อจำหน่าย 10 MW (หรือ10,000 kW) หากปั่นไฟ 24 ชั่วโมง/วัน จะได้ 240,000 kW-h/วัน หรือหน่วย/วัน ดังนั้นรายได้จากการจำหน่ายกระแสไฟฟ้ารวมกับอัตราส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน (adder) = 6.72 บาท/หน่วย x 240,000 หน่วย/วัน = 1,612,800 บาท/ วัน = 588,672,000 หรือ589 ล้าน บาท/ปี

เมื่อพิจารณาแล้วในหนึ่งปีน่าจะมีรายได้จากการกำจัดขยะ ร่วมกับการจำหน่ายกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 76,650,000 + 588,672,000 = 665,322,000 หรือประมาณ 665 ล้านบาทต่อปี ดังนั้นหากสามารถดำเนินการได้ตามนี้อาจคุ้มทุนได้ในระยะเวลาต่ำกว่า 2 ปี จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจมากสำหรับภาคเอกชนที่ต้องการลงทุน อย่างไรก็ตามผู้ประกอบการต้องคำนึงด้วยว่าการสนับสนุนราคารับซื้อไฟฟ้า (adder cost) มีระยะเวลาจำกัด และต้องมีค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการลงทุนบำรุงรักษาเครื่องจักรอุปกรณ์ของโรงเตาเผาขยะด้วย นอกจากนี้ในทางปฏิบัติองค์ประกอบของขยะมีขยะอินทรีย์ที่มีความชื้นสูงอยู่มาก ส่งผลให้การผลิตกระแสไฟฟ้าอาจได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากค่าความร้อนต่ำ

ประโยชน์ที่ได้รับจากแนวทางนี้คือ ทำให้เทศบาลสามารถสร้างเตาเผาใหม่ได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องการลงทุน ความร้อนที่ได้จากการเผาขยะสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานทดแทน เพื่อใช้ในโรงงานและจำหน่ายให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย นอกจากนี้โรงเตาเผาขยะแห่งใหม่ยังช่วยลดปริมาณขยะที่จะนำไปฝังกลบได้อย่างมาก โดยเมื่อพิจารณาช่วงเวลาก่อนหน้านี้ เทศบาลประสบกับภาวะวิกฤตเนื่องจากขยะที่เข้าระบบ มีปริมาณสูงเกินกว่าที่เตาเดิมจะรองรับได้ ทำให้ต้องนำไปฝังกลบและเกิดปัญหาขยะล้นบ่อจนสร้างความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม แต่เมื่อระบบโรงเตาเผาขยะที่ดำเนินการโดยเอกชนสร้างแล้วเสร็จในปี 2555 ก็สามารถรองรับปริมาณขยะที่เข้ามาวันละ 603 ตันได้ ส่วนในปี 2557 มีการคาดการณ์ปริมาณขยะที่ 694 ตัน/วัน ก็พบว่าโรงเตาเผาขยะที่สร้างขึ้นใหม่ยังสามารถรองรับได้แม้จะเกือบเต็มขีดความสามารถ (ที่700 ตัน) ทั้งนี้เตาเผาเดิมซึ่งรองรับได้ 250 ตัน/วันได้หยุดดำเนินการไปตั้งแต่ปี 2555 เนื่องจากเสื่อมสภาพ โดยทางเทศบาลมีแผนที่จะซ่อมแซมในช่วงปี 2557-2559 อย่างไรก็ตามสุดท้ายแล้วทางจังหวัดจำเป็นต้องหามาตรการรองรับสำหรับอนาคตที่ปริมาณขยะจะสูงเกินกว่าขีดความสามารถของเตาเผาทั้งหมดรวมกัน

4. แนวทางการแก้ปัญหาในอนาคต

จากข้อมูลล่าสุดในปี พ.ศ. 2556 จังหวัดภูเก็ตมีปริมาณขยะมูลฝอยเข้ามากำจัดที่ศูนย์กำจัดขยะมากกว่า 650 ตันต่อวัน เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มของขยะมูลฝอยที่สูงถึงร้อยละ 7.3 ต่อปี จะเห็นว่าจังหวัดจะประสบปัญหาขยะล้นเมืองในอีกไม่นาน ซึ่งหมายถึงระบบการกำจัดขยะที่มีอยู่จะไม่สามารถรองรับขยะจำนวนมากได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเตรียมรับสถานการณ์ในอนาคต การแก้ปัญหาที่ปลายทางโดยการลงทุนด้านเทคโนโลยีเป็นเรื่องที่จำเป็นต้องทำ แต่การป้องกันปัญหาตั้งแต่ต้นทางก็เป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะเป็นการจัดการปัญหาที่สาเหตุ การแก้ปัญหาที่ต้นทางทำได้โดยขอความร่วมมือจากทุกภาคส่วนในการลดการทิ้งขยะ ทั้งนี้ฝ่ายที่เกี่ยวข้องคือภาครัฐ/องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ภาคประชาชน และผู้ประกอบการ

ภาครัฐ/องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

ในเชิงนโยบายสาธารณะอาจกำหนดให้ภูเก็ตเป็นเมืองท่องเที่ยวเชิงยั่งยืน ซึ่งสามารถใช้เป็นจุดขายของเมืองได้ หากมีการดำเนินการอย่างจริงจังและได้รับความร่วมมือจากทุกฝ่าย ในที่นี้หลักการผู้ก่อมลพิษเป็นผู้จ่าย (Polluter pays principle) สามารถนำมาใช้ได้กับทุกภาคส่วน เช่น ให้เทศบาลคิดค่าธรรมเนียมการเก็บขยะตามจริง โดยอาจคิดตามน้ำหนัก มาตรการนี้สามารถใช้ได้กับทั้งผู้ประกอบการ

และชุมชน ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมให้ผู้ก่อมลพิษร่วมรับผิดชอบโดยตรง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเทศบาลกำหนดค่าธรรมเนียมเก็บขยะเพียงเดือนละ 40 บาท ซึ่งเพียงพอแค่ค่าขนส่งเท่านั้น ไม่ครอบคลุมค่ากำจัดขยะด้วย ดังนั้นจึงเป็นการผลักภาระให้กับเทศบาลค่อนข้างมาก

สำหรับนโยบายมหภาค มาตรการด้านภาษีเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยให้จังหวัดมีงบประมาณในการดำเนินการได้อย่างคล่องตัวมากขึ้น จังหวัดใดที่มีรายได้จากการท่องเที่ยวสูง จังหวัดนั้นควรได้รับการคืนภาษีจากภาครัฐเพื่อฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม

ภาคประชาชน

เนื่องจากภูเก็ตเป็นเมืองท่องเที่ยว ดังนั้นการกำหนดนโยบายเชิงบังคับจึงกระทำได้ยาก เพราะอาจส่งผลต่อสถานการณ์ท่องเที่ยว ทั้งนี้จึงควรกำหนดเป็นนโยบายเชิงบวกหรือนโยบายจูงใจ เช่น สนับสนุนให้นักท่องเที่ยวและชาวภูเก็ตปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการบริโภคทุกรูปแบบ โดยนำหลักการ 3R มาใช้ (reduce, reuse, recycle) ลดการบริโภคสินค้าฟุ่มเฟือยลงเพื่อลดการสร้างขยะ (reduce) พยายามนำกลับไปใช้ใหม่ (reuse) และส่งเสริมให้มีการรีไซเคิล (recycle) โดยปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการทิ้ง ทำการแยกขยะ เป็นต้น ทั้งนี้การแก้ปัญหาจะเกิดความยั่งยืนได้ก็ต่อเมื่อมีการปลูกฝังทัศนคติด้านสิ่งแวดล้อมให้แก่ประชาชนในท้องที่

ในประเด็นของการแยกขยะนั้น ในความเป็นจริงขยะมูลฝอยถูกคัดแยกมาตั้งแต่ต้นทางแล้ว โดยอาจกล่าวได้ว่าขยะมีเจ้าของตั้งแต่พ้นจากมือผู้ทิ้ง เริ่มตั้งแต่ซาเล้ง จนถึงพนักงานเทศบาล จนกระทั่งสุดท้ายเหลือขยะที่ไม่ค่อยมีมูลค่าเข้าสู่เตาเผา แม้จะมีการคัดแยกแล้วแต่ขยะเหล่านั้นก็ยังเปียกชื้นอยู่เนื่องจากมีขยะอินทรีย์เป็นจำนวนมากปะปนกับขยะพลาสติกที่ไร้มูลค่า (เช่น ถุงพลาสติก) แม้จะตากขยะไว้ในหลุมเป็นเวลาห้าวันก่อนเข้าเตาเผาก็ไม่ส่งผลให้ความชื้นลดลงมากนัก เมื่อนำขยะเข้าเตาเผาจึงทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเตาลดลงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นหากสามารถแยกขยะเปียกออกได้ตั้งแต่ต้นทางก็จะช่วยได้มาก

แนวทางหนึ่งที่ช่วยลดภาระของเทศบาลในการกำจัดขยะเปียก คือ อาจมีองค์กรกลาง(เช่น NGO องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม) เป็นตัวเชื่อมโยงในการรับขยะจากชุมชนมาทำเป็นปุ๋ยอินทรีย์ แล้วนำปุ๋ยอินทรีย์ไปขายให้กับภาคเกษตร วิธีการดังกล่าวถือเป็นแนวคิด “จากอู่สู่อู่” (cradle to cradle approach) ซึ่งถือเป็นการช่วยลดภาระทางสิ่งแวดล้อมได้โดยตรง

ผู้ประกอบการ

ในส่วนของภาคเอกชนนั้น หลักการ 3R ยังคงสามารถนำมาใช้ในการบริหารจัดการขยะได้เป็นอย่างดี ผู้ประกอบการควรนำหลักการของเสียเป็นศูนย์ (zero waste)มาใช้เพื่อลดขยะตั้งแต่ต้นทาง มีการนำขยะเปียกไปทำเป็นปุ๋ย ทำการคัดแยกขยะเพื่อนำไปรีไซเคิล เป็นต้น

5. สรุป

บทความนี้กล่าวถึงกรณีศึกษาของการบริหารจัดการขยะในเขตเทศบาลนครภูเก็ต จากกรณีศึกษาจะเห็นว่าจังหวัดเคยประสบปัญหาวิกฤตจนถึงขั้นที่มีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม และทำให้ชาวบ้านเดือดร้อน เทศบาลต้องจ่ายเงินชดเชยค่าเสียหายเป็นจำนวนมาก แม้ว่าต้นตอของปัญหาขยะจะเกิดจากชาวภูเก็ตและนักท่องเที่ยว แต่เมื่อเกิดปัญหาขึ้นผู้ที่มีหน้าที่รับผิดชอบคือเทศบาล ดังนั้นการมอบอำนาจให้กับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและการจัดสรรภาษีจึงเป็นเรื่องจำเป็น

ในปัจจุบันเทศบาลนครภูเก็ตเป็นแกนนำในการจัดการขยะร่วมกับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่นๆ ในจังหวัด จนประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหามลพิษที่เกิดจากขยะมูลฝอยชุมชนได้เป็นอย่างดีแม้จะไม่ได้รับความช่วยเหลือจากรัฐบาลเท่าที่ควร การแก้ปัญหาโดยให้เอกชนมาลงทุนสร้างโรงไฟฟ้าเตาเผาขยะ เป็นแนวทางที่ช่วยให้เทศบาลสามารถดำเนินการต่อไปได้ภายใต้งบประมาณจำกัด และถือเป็นต้นแบบแรกในประเทศไทยที่มีการดำเนินการจัดการขยะในลักษณะนี้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม การขยายตัวของการท่องเที่ยวและการเพิ่มของจำนวนประชากร จะส่งผลให้ปริมาณขยะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทางเทศบาลจึงต้องมีการเตรียมการรองรับในอนาคต การลงทุนสร้างเตาเผาขยะใหม่หรือซ่อมแซมเตาเมื่อเตาเดิมเสื่อมสภาพเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำ อย่างไรก็ตามการจัดการขยะแบบยั่งยืนจำเป็นต้องอาศัยการมีส่วน

ร่วมจากทุกภาคส่วนโดยมุ่งแก้ปัญหาที่ต้นทาง หากมีการดำเนินการที่ดีก็จะสามารถบรรลุเป้าหมายที่ต้องการได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายกเทศมนตรีภูเก็ต นางสาวสมใจ สุวรรณศุภนา และคณะ ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลและอำนวยความสะดวกในการลงพื้นที่ และขอขอบคุณกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมและสถาบันพระปกเกล้า ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณและอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

[1] วัฒนธรรมขยะ : บทบรรณาธิการประจำวันศุกร์ที่ 21 มีนาคม 2557 หนังสือพิมพ์คมชัดลึก http://www.komchadluek.net/mobile/detail/20140321/181287.html สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2557

[2] ข้อมูลจำนวนประชากรตามทะเบียนราษฎร์ กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย http://stat.bora.dopa.go.th/stat/sumyear.html สืบค้นเมื่อ 19 พค 2557

[3] สมใจ สุวรรณศุภพนา และคณะ, ธรรมาภิบาลสิ่งแวดล้อม กรณีศึกษาการบริหารศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยชุมชน จังหวัดภูเก็ต, สถาบันพระปกเกล้า 2557

[4] Pakakrong On, Phuket Save ขยะพิษแลกยา เมื่อขยะอันตรายมีคุณค่า นำมาแลกยาได้, Phuket Journal, July 13, 1011 http://www.phuketjournal.com/phuket-save-1994.html สืบค้นเมื่อวันที่ 28 กค 2557

[5] Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S. A. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues, McGraw Hill, 1993

ตัวอย่างการจัดพิมพ์เอกสารต้นฉบับสำหรับตีพิมพ์ใน วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ชื่อบทความภาษาไทย Angsana New (ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม)

ชื่อบทความภาษาอังกฤษ Angsana New(ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม)

มาลี สันติคุณาภรณ์[1)] และ พินัย ทองสวัสดิ์วงศ์[2)] (ขนาด 14 จุด)

Malee Santikunaporn[1)] and Pinai Thongsawatwong[2)]

[1)]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี [2)]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อ.คลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121 (ขนาด 12 จุด)

บทคัดย่อ

ตัวอย่างการจัดพิมพ์เอกสารต้นฉบับสำหรับตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ควรปฏิบัติตามคำแนะนำอย่างเคร่งครัด บทคัดย่อควรมีเพียงย่อหน้าเดียวที่อธิบายถึง วัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา ผลการศึกษา และสรุป ไม่ควรเกิน 300 คำ คำหลักที่เป็นภาษาอังกฤษให้ตัวอักษรคำแรกเป็นตัว พิมพ์ใหญ่ คำในลำดับถัดไปเป็นตัวพิมพ์เล็ก

คำสำคัญ : จำนวน 4 ถึง 6 คำ ภาษาไทยแต่ละคำเว้นวรรค 1 จุด ไม่ต้องมีจุลภาค (,)

Abstract

This is an instruction for manuscript preparation a publication in Thammasat Engineering Journal. Please follow this guideline strictly. The abstract should contain a single paragraph describing objectives, methodology and a summary of important results and its length should not exceed 300 words.

Keywords : 4-6 keywords, separated by colons.

1. บทนำ

บทความนี้แสดงตัวอย่างแนวทางการเตรียมต้นฉบับเพื่อตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และโปรดปฏิบัติตามหลักเกณฑ์อย่างเคร่งครัด จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word ความยาวของต้นฉบับจะต้องไม่เกิน 10 หน้า มีจำนวนคำไม่เกิน 10,000 คำ

1.1. ขนาดกระดาษและระยะขอบ

ใช้กระดาษขนาด A4 ปรับเค้าโครงขนาดกระดาษความกว้าง 7.5 นิ้ว ความสูง 10.5 นิ้ว และรูปแบบหน้าเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่าง 0.19 นิ้ว กรอบของบทความกำหนดดังนี้ ขอบด้านบน 0.88 นิ้ว ขอบด้านล่าง 0.75 นิ้ว ด้านซ้าย 1 นิ้วและด้านขวา 0.75 นิ้ว ให้เว้น 1 บรรทัดระหว่างหัวเรื่องทุกครั้ง ให้เป็นไปตามรูปแบบของวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์

สามารถโหลดรูปแบบได้ที่ http://tej.engr.tu.ac.th

1.2. ชนิดตัวอักษร

ในบทความฉบับภาษาไทยและภาษาอังกฤษจะต้องใช้ตัวอักษร Angsana New ทั้งหมด ชื่อบทความใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด ตัวหนา ผู้แต่งใช้ตัวอักษรธรรมดาขนาด 14 จุด สถาบันและข้อมูลติดต่อใช้ตัวธรรมดาขนาด 12 จุด หัวเรื่องและหัวเรื่องย่อยใช้อักษรธรรมดาขนาด 14 จุด การบรรยายและเนื้อหาใช้ตัวธรรมดาขนาด 14 จุด คำในวงเล็บที่เป็นภาษาอังกฤษให้เป็นตัวเล็กทั้งหมด

1.3 สำหรับการลำดับหัวข้อย่อย

ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14 จุด ใช้ตัวเอียง ให้ชิดทางกรอบซ้าย แต่ละหัวข้อย่อยจะเว้น 1 บรรทัด (ปรับให้บรรทัดมี

ขนาดเท่ากับอักษรขนาด 8 จุด) ส่วนหัวข้อย่อยให้เขียนตามตัวอย่าง ดังรายการต่อไปนี้

1. รายการแรกในรายการนี้
2. รายการที่สอง
   2.1. รายการย่อย
3. รายการสุดท้าย

1.4 โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับดังนี้

1. บทนำ
2. วิธีการการวิจัย
3. ผลการวิจัยและอภิปราย
4. สรุป
5. กิตติกรรมประกาศ
6. เอกสารอ้างอิง

2. ชื่อบทความ

ชื่อบทความให้เริ่มต้นบทความที่บรรทัดแรก โดยใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด และเป็นตัวหนา จัดชื่อบทความกลางกรอบ

3. ชื่อผู้แต่งและสถานที่ติดต่อ

ชื่อผู้แต่งให้พิมพ์ใต้ชื่อบทความ จัดชื่อผู้แต่งให้อยู่กลาง ใช้ตัวอักษรธรรมดาขนาด 14 จุด ในกรณีมีผู้ทำวิจัยหลายท่านจากหน่วยงานต่างกันให้กำกับตัวยก 1), 2) ไว้หลังชื่อ สำหรับ Corresponding ให้ใส่เครื่องหมาย *กำกับไว้ท้ายชื่อ สถานที่ติดต่อ ให้พิมพ์ที่อยู่หน่วยงาน รหัสไปรษณีย์ ประเทศ พิมพ์ใต้ชื่อผู้แต่งใช้ตัวธรรมดาขนาด 12 จุด จัดกลาง

4. บทคัดย่อ

บทความภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ให้เว้น 1 บรรทัดจากสถานที่ติดต่อ พิมพ์บทคัดย่อใต้หัวข้อ “บทคัดย่อ/Abstract” เนื้อความของบทคัดย่อไม่ควรเกิน 15 บรรทัด หรือ 300 คำ ส่วนบทความภาษาอังกฤษไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย

5. คำสำคัญ

บทความแต่ละเรื่องควรจะมีคำสำคัญ 4-6 คำ เพื่อระบุหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงในบทความ ควรใส่คำสำคัญต่อจากบทคัดย่อโดยไม่ต้องเว้นบรรทัด

6. เนื้อความ

เมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่ ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้นพิมพ์ย่อหน้าใหม่ ให้พิมพ์บทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4

7. ผลการวิจัย

เสนอผลการวิจัยอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ หรือตารางประกอบ ซึ่งเมื่อมีรูปหรือตารางประกอบต้องระบุเชื่อมโยงในเนื้อหาบทความ การอธิบายไม่ซ้ำซ้อนกัน สำหรับการระบุหน่วยต่างๆ ใช้ภาษาไทยและใช้การอธิบายเปอร์เซ็นต์ด้วยคำว่า ร้อยละ ในกรณีที่กำหนดหน่วยเป็นภาษาอังกฤษให้ระบุแบบเดียวกันทั้งหมด

7.1. การลำดับตัวเลข

การลำดับตัวเลขเพื่ออ้างถึง รูปภาพ ตารางและสมการ จะต้องเป็นเลขอารบิค ทุกสมการจะต้องมีวงเล็บวางไว้ชิดขอบขวา ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$\bar{\lambda}_g = \frac{\mu}{p}\left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2} \qquad (1)$$

ตัวอักษรในสมการให้ใช้ Times new Roman ขนาด 10 ตัวสัญลักษณ์ให้ใช้ Symbol ขนาด 10 ใช้ MathType หรือ Equation Editor ในการเขียนสมการ

7.2. รูปภาพและตาราง

รูปภาพและตารางจะต้องมีความกว้างเพียงพอที่จะลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือในกรณีจำเป็น เพื่อการรักษารายละเอียดในภาพอาจยอมให้กว้างเต็มหน้ากระดาษ ผู้แต่งจะต้องรับผิดชอบในการจัดภาพให้อยู่ในขนาดที่กำหนดนี้ โดยสามารถมองเห็นรายละเอียดและอ่านตัวหนังสือในภาพได้ชัดเจน โดยตัวอักษรที่ใช้อธิบายรูปจะต้องไม่ต่ำกว่าขนาด 10 จุด รูปภาพลายเส้นจะต้องใช้เส้นหมึกสีดำวาดด้วยโปรแกรมเช่น Visio, Adobe Illustrator, Macromedia Free-hand หรือโปรแกรมวาดรูปอื่นๆ ส่วนภาพถ่ายควรเป็นภาพที่มีความคมชัด

รูปภาพควรมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็น รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายภาพกำกับใต้ภาพ โดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ จาก รูปที่ 1, รูปที่ 2, ... พิมพ์หมายเลข

และชื่อรูปไว้ใต้รูปภาพ จะต้องกำหนดให้อยู่ตรงกลางเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัด หลังคำบรรยายรูป รูปภาพทุกรูป และตารางทุกตารางที่ปรากฏในบทความจะต้องมีการอ้างอิงในเนื้อหา

ในกรณีที่เป็นตารางจะต้องมีคำบรรยายกำกับตารางไว้เหนือตาราง โดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ จาก 1, 2, 3,... ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัดก่อนคำบรรยายตารางและหลังตาราง ตามตัวอย่างตารางดังนี้

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 1

ตารางที่ 1

Redox moiety	Diluent	Method	k0 (s-1)
R1	D1	ILIT	3.4×10^4
		CV	3.3×10^4
R2	D2	ILIT	6.0 x 104

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

ตารางที่ 2

x	a_r / m_r	$2\zeta_r\omega_r$
0.1	2.7470e+01	2.7483e+01
0.5	3.5352e+01	3.5360e+01

การแสดงกราฟแท่ง ไม่ควรใช้กราฟ 3 มิติ

8. การอภิปรายผล

การอภิปรายผลวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น เพื่อเสนอลู่ทางที่จะใช้ประโยชน์ หาข้อยุติในการวิจัยบางอย่าง ฯลฯ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลอาจนำมาเขียนไว้ในตอนเดียวกัน

9. สรุป

สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

10. กิตติกรรมประกาศ

การแสดงความขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุน ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป

11. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงใช้ระบบแวนคูเวอร์ (vancuvour style) ในกรณีที่เป็นภาษาไทย ให้เขียนเป็นภาษาอังกฤษด้วย และต่อท้ายด้วย (In Thai) ส่วนชื่อผู้แต่งให้ใช้นามสกุลขึ้นก่อนแล้วตามด้วยอักษรย่อของชื่อนั้น

11.1 การอ้างอิงในเนื้อหา

แบบการอ้างอิงเอกสารในเนื้อหาของบทความ ใช้ระบบตัวเลข ให้เรียงลำดับเลขตามลำดับของเอกสารที่มีการอ้างถึงในเนื้อหาและหมายเลขที่อ้างถึงในเนื้อเรื่องนั้นจะต้องตรงกับหมายเลขที่มีการกำกับไว้ในส่วนเอกสารอ้างอิงด้วย ให้ใช้ตัวเลขอารบิคในวงเล็บต่อท้ายข้อความที่นำมาอ้างอิงในบทความ เช่น [1] หรือ [2-4, 8, 10] หมายถึงอ้างถึงลำดับผู้แต่งที่ 1 หรือ ลำดับที่ 2, 3, 4, 8, 10 โดยเรียงลำดับจากหมายเลข 1, 2, 3,... ไปจนถึงเลขที่สุดท้าย ตามการอ้างอิง การเขียนเอกสารอ้างอิง

11.2 ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิงท้ายเรื่อง

เขียนอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ และใส่อ้างอิงในท้ายเรื่องเฉพาะที่มีปรากฏในเนื้อหาบทความหรือบทความวิจัยเท่านั้น

1) การเขียนอ้างอิงจากหนังสือ

[1] Murray PR, Rosenthal KS, Kobayashi GS, Pfaller MA. Medical microbiology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2002.

2) การเขียนอ้างอิงจากวารสาร

[2] Bua-art S, Saksirirat W, Kanokmedhakul S, Hiransalee A, Lekphrom R. Extraction of bioactive compounds from luminescent mushroom (Neonothopanus nambi) and its effect on root-knot nema-tode (Meloidogyne incognita). KKU Res J. 2010;15(1): 726-37. (In Thai).

3) การเขียนอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์

[3] Srisuk M. Cloning and characterization of gene insulin [MSc thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2002. (In Thai).

4) การเขียนอ้างอิงจากบทความจากการประชุมวิชาการ

[4] Bengtsson S, Solheim BG. Enforcement of data protection, privacy and security in medicalinformatics. In: Lun KC, Degoulet P, Piemme TE, Rienhoff O,

editors. MEDINFO 92. Proceedings of the 7th World Congress on Medical Informatics; 1992 Sep 6-10; Geneva, Switzerland. Amsterdam: North-Holland; 1992. p. 1561-5.

5) การเขียนอ้างอิงจากบทความจากสิทธิบัตร

[5] Pagedas AC, inventor; Ancel Surgical R&D Inc., assignee. Flexible endoscopic grasping and cutting device and positioning tool assembly. United States patent US 20020103498. 2002 Aug 1.

6) บทความวารสารอิเล็กทรอนิกส์

[6] Morse SS. Factors in the emergence of infectious diseases. Emerg Infect Dis [serial online] 1995 Jan-Mar [cited 1996 Jun 5];1(1):[24 screens]. Available from: URL: http://www.cdc.gov/ncidod/EID/eid.htm.

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาลงตีพิมพ์วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ขอส่งบทความ

บทความวิจัย สาขา……..……..

บทความวิชาการ สาขา……..…..……..

ชื่อบทความ (ภาษาไทย) .....

.....

(ภาษาอังกฤษ) .....

.....

ชื่อ-นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย)	ชื่อ-นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาอังกฤษ)
1.....	1.....
2.....	2.....
3.....	3.....
4.....	4.....
5.....	5.....
6.....	6.....

ชื่อ-และที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้สะดวก

.....

.....

.....จังหวัด.....

รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

โทรศัพท์มือถือ.....โทรสาร.....

E-mail: ……

แนะนำผู้อ่านบทความ……

……

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ [ ] เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

[ ] เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามรายชื่อที่ระบุ ในบทความจริง

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความดังกล่าวลงตีพิมพ์ในวารสารฉบับอื่น ทั้งนี้ หากข้าพเจ้าขอถอนบทความและไม่ลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ หรือเพิกเฉยไม่ส่งบทความฉบับแก้ไขเพื่อลงตีพิมพ์ข้าพเจ้าจะเป็นผู้รับผิดชอบค่าตอบแทนผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความทั้งหมด

ลงนาม.....

(.....)

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ
วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน 2557)

ผศ.ดร.กานดิส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ชวลิต กิตติชัยการ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.สุรพล ผดุงทน	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.นิษฐิดา เอลซ์	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.ปณิธาน พีรพัฒนา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.วรากร เกษมสุวรรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วัชรินทร์ กาสลัก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.วีรยา ฉิมอ้อย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สมชาย จันทร์ชาวนา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรรถพล สมุทคุปต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่