การใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ส่วนอโลหะ) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

มงคลชัย อัศวดิษฐเลิศ, เจริศา จำปา

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การจัดการซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากในปัจจุบันเรามีความต้องการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการและเพิ่มความสะดวกสบาย ในชีวิตประจำวันรวมถึงรูปแบบพฤติกรรมการบริโภคตามการพัฒนาด้านไอที โดยการเปลี่ยนรุ่นของเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ชนิดสมาร์ทโฟน และโทรทัศน์ชนิดสมาร์ททีวี เป็นต้น

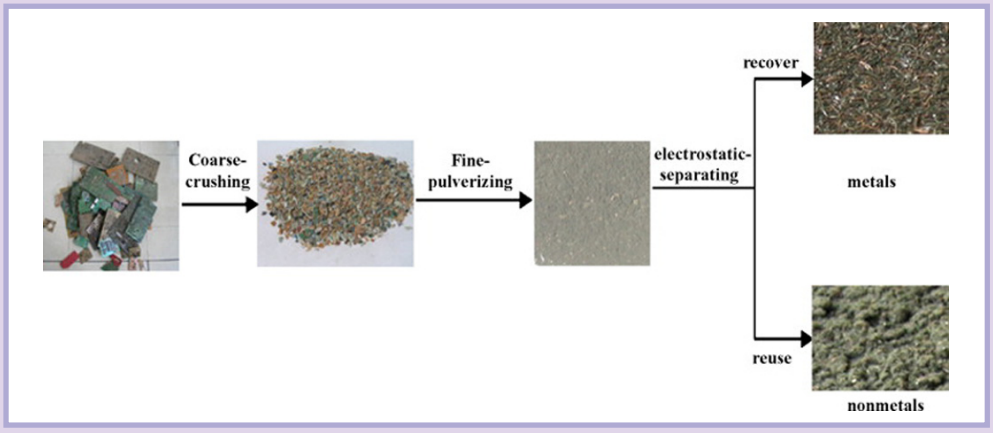
จากรายงานสถานการณ์มลพิษประจำปี 2558 ของกรมควบคุมมลพิษ คาดการณ์ว่า ขยะที่เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ราว 4 แสนตัน และยังได้มีการสำรวจและรวบรวมข้อมูลพฤติกรรมของผู้บริโภคในการจัดการกับผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เมื่อไม่ได้ใช้งานแล้วซึ่งแหล่งกำเนิด

ส่วนใหญ่มาจากบ้านเรือน กว่าร้อยละ 50 มีการจัดการโดยขายซากผลิตภัณฑ์ฯ เมื่อไม่ได้ใช้งานแล้ว การแลกคืนเพื่อใช้เป็นส่วนลดในการซื้อผลิตภัณฑ์ใหม่ด้วย และบางส่วนเก็บรวบรวมไว้ทิ้งปนไปกับขยะมูลฝอยทั่วไป (รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย, 2558)

ในปัจจุบันการจัดการซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะมีกระบวนการคัดแยกเอาโลหะที่มีค่าออกก่อน โดยโรงงานอุตสาหกรรมประเภท 105 และ 106 คือ โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยกหรือฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียจากโรงงานมาผลิตเป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ใหม่โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรม ตามลำดับ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)

ปัญหาสำหรับการจัดการซากแผงวงจรอิเล็คทรอนิกส์

เมื่อมีการคัดแยกโลหะเพื่อนำไปหลอมโลหะเพื่อไปใช้ประโยชน์ใหม่ ถือว่าเป็นทางออกทั้งในด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ที่ดี ที่จะนำทรัพยากรธรรมชาติกลับมาใช้อย่างคุ้มค่า และลดการนำทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ประโยชน์ ยิ่งในปัจจุบันสถานการณ์เหมืองแร่ในประเทศได้มีการระงับการเปิดสัมปทานเหมืองเพื่อนำไปถลุง ทำให้มีการนำเข้าโลหะจากต่างประเทศมากขึ้น ปัญหาสำคัญอยู่ที่ซากแผงวงจรอิเล็คทรอนิกส์ มีโลหะเพียงร้อยละ 30 แต่อีกร้อยละ 70 คือ ซากแผ่นวงจรอิเล็คทรอนิกส์ ชนิดอโลหะ หรือแผงวงจรสีเขียวที่เรียกเรียกว่า Printed circuit board ดังรูปที่ 1 ซึ่งในบทความนี้จะขอใช้คำย่อว่า NMP-PCB (Non-metallic part -printed circuit board) ซึ่ง NMP-PCB จะต้องนำไปสู่กระบวนการฝังกลบอย่างปลอดภัย เพราะในองค์ประกอบของ NMP-PCB ยังมีสารอันตรายอยู่ และหากนำไปฝังกลบก็จะนำไปสู่การเกิดมลพิษจากโลหะหนักและสารหน่วงไฟประเภทโบรมีน (Brominated Flame Retardants: BERs) ปนเปื้อนไปกับน้ำใต้ดิน ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นการบำบัด/กำจัด หรือรีไซเคิล ต้องดำเนินการอย่างถูกต้องและเหมาะสมปัจจุบันเริ่มมีการคิดค้นเพื่อนำในส่วนที่ไม่ใช่โลหะนี้กลับมาใช้มากขึ้นทั้งนี้องค์ประกอบของ NMP-PCB ได้แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 *การแยกองค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์*
(ที่มา : *ปรับจาก Huang et al., 2009)*

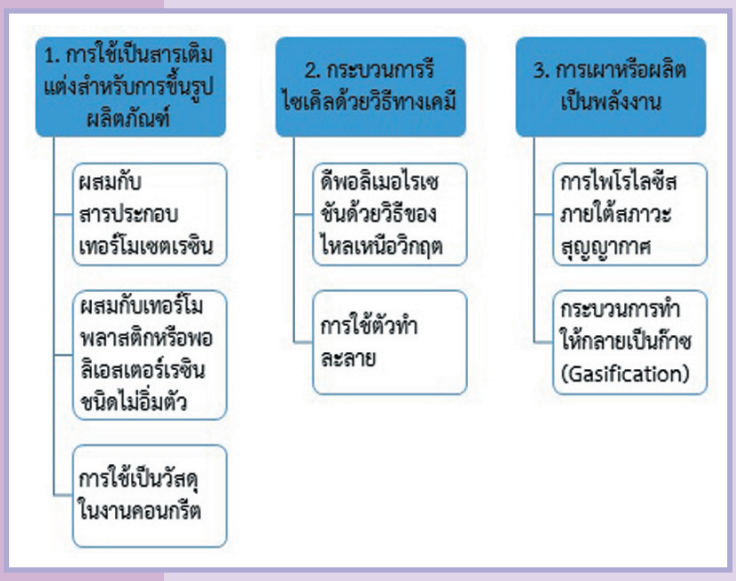
ตารางที่ 1 องค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

วัสดุที่เป็นองค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
พลาสติกเทอร์โมเซ็ตเรซิน	32
ไฟเบอร์กลาส	65
ทองแดง	< 3
อื่นๆ เช่น ตัวประสาน และสารหน่วงไฟผสมโบรมีน	<0.1

การใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็คทรอนิกส์ (ส่วนอโลหะ)

เมื่อมีการคัดแยกโลหะที่มีค่าออกจากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์แล้ว ซากแผงวงจรอิเล็คทรอนิกส์ (ส่วนอโลหะ) จะถูกทิ้งไว้ เพื่อรอการกำจัดด้วยการฝังกลบอย่างถูกวิธี ดังนั้นหากพิจารณาถึงความเหมาะสมแล้ว การฝังกลบนั้นควรเป็นทางเลือกสุดท้ายในการจัดการ NMP-PCB และเมื่อพิจารณาจากลำดับขั้นตอนในการจัดการควรจะเลือกวิธีการเพื่อนำของเสียมาใช้ประโยชน์ใหม่ ก่อนที่จะมีการนำไปเผาทำลายเพื่อให้ได้พลังงาน

ส่วนประกอบที่ไม่ใช่โลหะจากซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 70 มาจากวัสดุที่ใช้ทำแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเทอร์โมเซตเรซิน (Thermoset Resin) และใยแก้ว (Fiber Glass) ซึ่งเทอร์โมเซตเรซินเป็นวัสดุที่ไม่สามารถนำไปหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และการเผาไม่ใช่ทางเลือกในการบำบัดสารกลุ่มนี้ เนื่องจากสารกลุ่มนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้เชื้อเพลิงลดลง และก่อให้เกิดสารที่เป็นพิษสูง คือ Polybrominated Dibenzodioxin และ Dibenzofurans และหากนำไปฝังกลบก็จะนำไปสู่การเกิดมลพิษจากโลหะหนักและสารหน่วง ไฟประเภทโบรมีน (Brominated Flame Retardants: BERs) ปนเปื้อนไปกับน้ำใต้ดิน ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นการบำบัด/กำจัด หรือรีไซเคิล ต้องดำเนินการอย่างถูกต้องและเหมาะสม ปัจจุบันเริ่มมีการคิดค้นเพื่อนำในส่วนที่ไม่ใช่โลหะนี้กลับมาใช้มากขึ้น โดยนำกลับมาใช้เป็นสารเติมแต่งใน epoxy resin เช่น กาว, สี, อุปกรณ์ตกแต่งบ้าน และอุปกรณ์ในการก่อสร้าง ซึ่งสามารถก่อให้เกิดประโยชน์ได้มากกว่าการนำชิ้นส่วนของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ใช่โลหะนี้ไปฝังกลบ



รูปที่ 2 ภาพรวมแนวทางการใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ส่วนอโลหะ)

แนวทางการรีไซเคิลส่วนประกอบที่ไม่ใช่โลหะจากซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำไปเป็นสารเติมแต่งหรือส่วนผสมของเทอร์โมเซตเรซิน ส่วนผสมของเทอร์โมพลาสติก หรือใช้ทดแทนวัสดุที่มีสมบัติแข็งและคุณสมบัติเหนียวยืดหยุ่น เป็นต้น ส่วนวิธีทางเคมีรวมถึงการนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงาน เช่น การเผาแบบไพโรไลซิส

การเผาแบบแก๊สซิฟิเคชัน การดีพอลิเมอไรเซชันของเหลวเหนือจุดวิกฤต และการย่อยสลายด้วยการเติมไฮโดรเจน โดยสามารถสรุปโดยสังเขป ดังรูปที่ 2

1. การใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

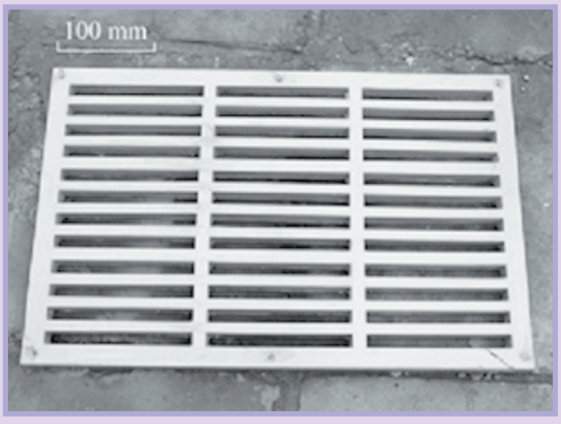
1.1 การใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับสารประกอบเทอร์โมเซตเรซิน

Guo et al. (2008) ได้นำซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาบดให้เป็นผงด้วยกระบวนการบดหยาบ แล้วนำไปบดละเอียด และ แยกส่วนที่เป็นโลหะออกจากส่วนที่ไม่ใช่โลหะด้วยเครื่องคัดแยกไฟฟ้าสถิต จากนั้นนำ ส่วนที่ไม่ใช่โลหะไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.15 มิลลิเมตร แล้วนำส่วนที่ผ่านตะแกรง มาผสมกับ ฟีนอลิกเรซิน ผงขี้เลื่อย ผงแป้งทัลก์ เฮกซะเมทิลอีเนเตตระเอมีน แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมออกไซด์ ไนโกรซีน (Nigrosine) และกรดเสตียริก พบว่า สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนได้ ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 3 *ตัวอย่างการขึ้นรูปของ phenolic molding compound (PMC) ที่มีส่วนผสมของ NMP-PCB* ***(ที่มา;*** *Huang et al., 2009)*

1.2 การใช้ NMP-PCB ผสมกับเทอร์โมพลาสติกหรือพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resins : UPRs) มีคุณสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดไม่อิ่มตัว มีความหนืดต่ำ ทนต่อสารเคมีและราคาถูก อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางกลที่ดี โดยเฉพาะเมื่อเสริมแรงด้วยไฟเบอร์หรือสารเติมแต่ง Mou และคณะ (2007) ได้พัฒนาเทคนิคในการผลิตแผ่นอโลหะจากซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Nonmetallic Plate : NMP) ด้วยการใช้ส่วนประกอบที่ไม่ใช่โลหะผสมกับเทอร์โมพลาสติกหรือพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว และเติมสารเติมแต่งอื่นๆ ซึ่งพบว่า ปริมาณซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่บดแล้วที่ใช้ผสมและได้คุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุดอยู่ที่ 20% โดยน้ำหนัก โดยมีตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้วัสดุรีไซเคิลนี้ คือ ตะแกรงฝาท่อน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4

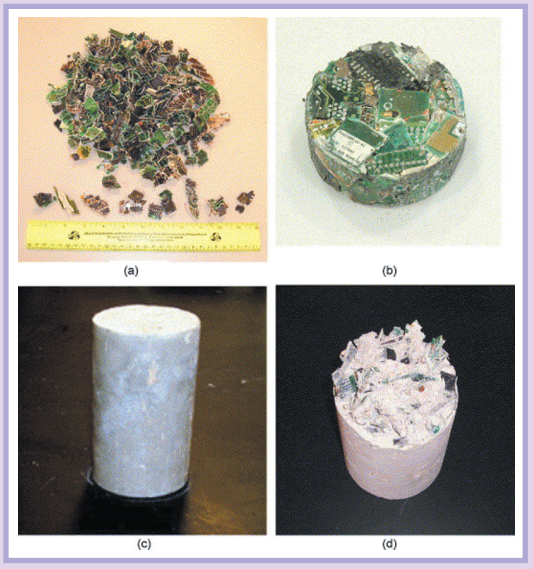


รูปที่ 4 *ผลิตภัณฑ์ที่ผสมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวกับส่วนประกอบที่ไม่ใช่โลหะ* ***(ที่มา;*** *Mou et al., 2007)*

1.3 การใช้ NMP-PCB มาใช้เป็นวัสดุในคอนกรีต

การประยุกต์ใช้การนำซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตมวลเบา เพราะปัจจุบันนี้คอนกรีตมวลเบานิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในงานก่อสร้างและงานตกแต่งผนังทั้งภายนอกและภายในโดยวัสดุที่นำมาผสมกัน ได้แก่ ซีเมนต์ ทราย ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่บดหยาบแล้ว และน้ำ ซึ่งซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอ-

นิกส์ที่ผ่านการบด ทำหน้าที่เป็นส่วนผสมหยาบสำหรับคอนกรีตมวลเบา โดยขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างสอดคล้องกับมาตรฐานการทดสอบคอนกรีต ASTM C192 ดังแสดง ในรูปที่ 5 โดยการใช้ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการบดแล้วแทนที่ซีเมนต์ และทราย พบว่ามีข้อได้เปรียบหลายประการ โดยช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ความต้านทานแรงกด ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความสามารถในการให้น้ำซึมผ่าน

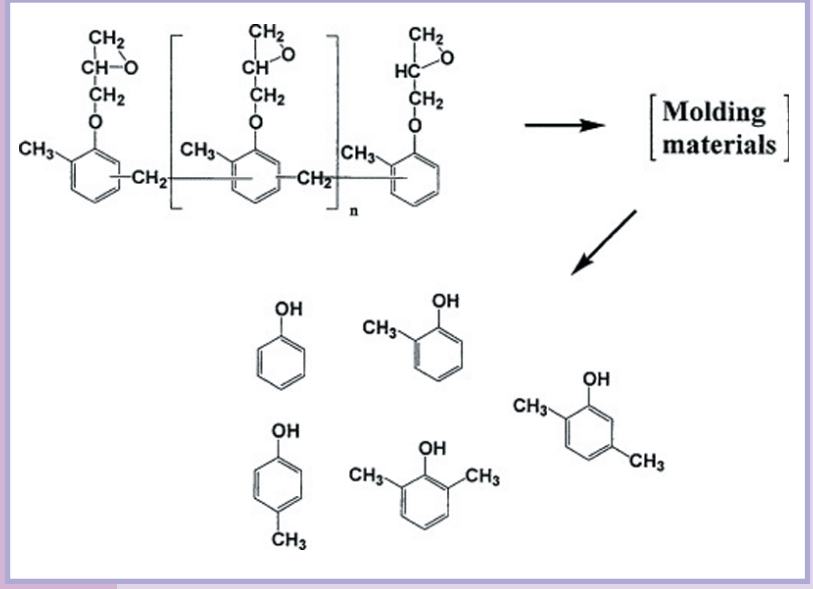


รูปที่ 5 *a) ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่บดแล้ว b) ซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการบดอัดที่ความดัน 103 MPa c) ซีเมนต์ที่ผสมซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ d) ซีเมนต์ที่ผสมซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้านใน (ที่มา; Niu และ Li , 2007)*

2. กระบวนการรีไซเคิลด้วยวิธีทางเคมี

2.1 ดีพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical fluid)

หลักการของวิธีนี้ คือ ในสภาวะอุณหภูมิและความดันค่าหนึ่ง สารบริสุทธิ์ใดๆ สามารถเป็นทั้งของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว โดยเรียกสภาวะนี้ว่า จุดวิกฤต (Critical Point) ถ้าเพิ่มอุณหภูมิหรือความดันให้สูงว่าจุดวิกฤตนี้ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของของไหล และเรียกของไหลที่อยู่ในสภาวะนี้ว่าของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid) โดยทั่วไปน้ำเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Water: SCW) มักใช้เป็นสื่อกลางที่มีประสิทธิภาพในการรีไซเคิลไฟเบอร์และเรซิน เนื่องจากเป็นตัวกลางที่มีราคาไม่แพง รีไซเคิลได้ ไม่เป็นพิษ และจัดการได้ง่าย โดยภายใต้สภาวะเหนือจุดวิกฤตน้ำ สารประกอบอินทรีย์ และก๊าซจะผสมกันได้อย่างสมบูรณ์ น้ำเหนือจุดวิกฤตยังนับว่าเป็นสารตัวกลางที่ก่อให้เกิดสภาวะที่พอเหมาะต่อปฏิกิริยาเคมีหลายประเภท รวมถึงการกำจัดซากของเสียอันตรายด้วย โดยกระบวนการดีพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีของไหลเหนือวิกฤตจะเกิดโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงและเป็นกลุ่ม PAHs ดังรูปที่ 6

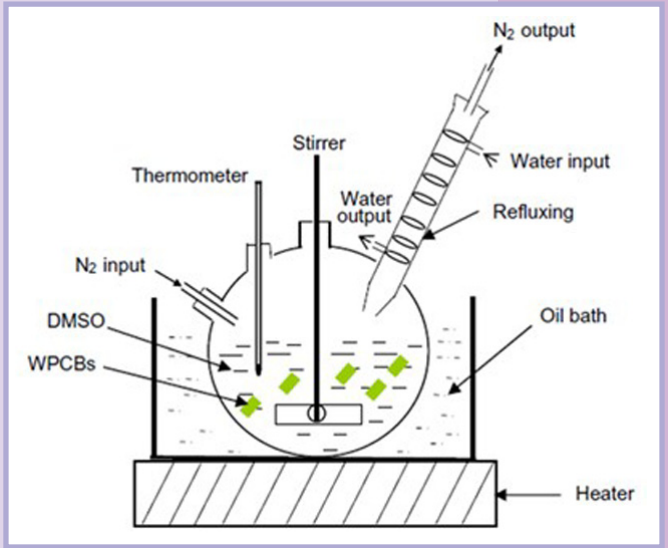


รูปที่ 6 *กระบวนการดีพอลิเมอไรเซชันอีพอกซีเรซินในส่วนอโลหะจากซากแผ่นวงจรพิมพ์ (ที่มา; Chien et al., 2000)*

2.2 การใช้ตัวทำละลาย (Chemical extraction)

วิธีนี้จะใช้สารสะลายอินทรีย์หรืออนินทรีย์ในการตัดสายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ของ Epoxy Resin ในแผงวงจรส่วนประกอบที่ไม่ใช่โลหะ (Non-Metallic Material) ให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก (ดังรูปที่ 7) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการละลายจะมี 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นสารที่ละลายในสารละลาย โดยส่วนนี้สามารถ นำกลับไปเป็นสังเคราะห์ใหม่เป็น Epoxy Resin ได้ และส่วนที่ไม่สามารถละลายในสาร

ละลายได้ซึ่งเป็น Glass Fiber ส่วนนี้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่อเป็นสารเติมแต่ง (Filler) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุต่างๆ โดยมีปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ สัดส่วนของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการบดต่อตัวทำละลาย ความร้อนในระบบ ขนาดของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการบดแล้ว และเวลาที่ใช้ในการทำการละลาย



รูปที่ 7 *ภาพของเครื่องทำปฏิกิริยาของพงวงจรในสารละลาย (**ที่มา;** Zhu et al., 2013)*

3. การเผาหรือการนำใช้เป็นพลังงาน

3.1 การไพโรไลซีสภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการรีไซเคิลพอลิเมอร์สังเคราะห์ รวมถึงพอลิเมอร์ที่ผสมอยู่กับ ไฟเบอร์กลาส กระบวนการนี้สารอินทรีย์จะถูกกลั่นแยกออกมาในรูปของเหลวและก๊าซโดยไม่เกิดการแตกสลาย ของโมเลกุล ก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) และคาร์บอนมอนออก-ไซด์ (CO) และยังมีไฮโดรคาร์บอน C1-C4 และก๊าซฮาโลเจนอนินทรีย์อีกด้วย (โดยมีกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 8) ส่วนที่เป็นโลหะที่เหลือส่วนใหญ่ คือ ทองแดง แคลเซียม เหล็ก นิกเกิล สังกะสี และอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังมีโลหะที่มีค่าจำนวนเล็กน้อย เช่น แกลเลียม บิสมัท เงิน และทองคำ เป็นต้น ส่วนสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ประกอบด้วยสารเข้มข้นของ Phenol, (4-(1-Methylethyl) Phenol), p-Hydroxydiphenyl, Bisphenol A, Methyl Phenols และ Bromophenols นอกจากนี้ยังพบ Organophosphate Compounds และTetrabromobisphenol A ในปริมาณเล็กน้อย สำหรับส่วนประกอบของของเหลวหรือน้ำมันนั้น มีรายงานว่าส่วนประกอบหลักประกอบไปด้วยสารประกอบพวกฟีนอลและฟิวแรน และส่วนของก๊าซ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ เมทิลโบรไมด์ ไฮโดรเจนโบรไมด์ และสารอื่นพวกแอลเคน และแอลคีน

3.2 กระบวนการทำให้กลายเป็นก๊าซ (Gasification)

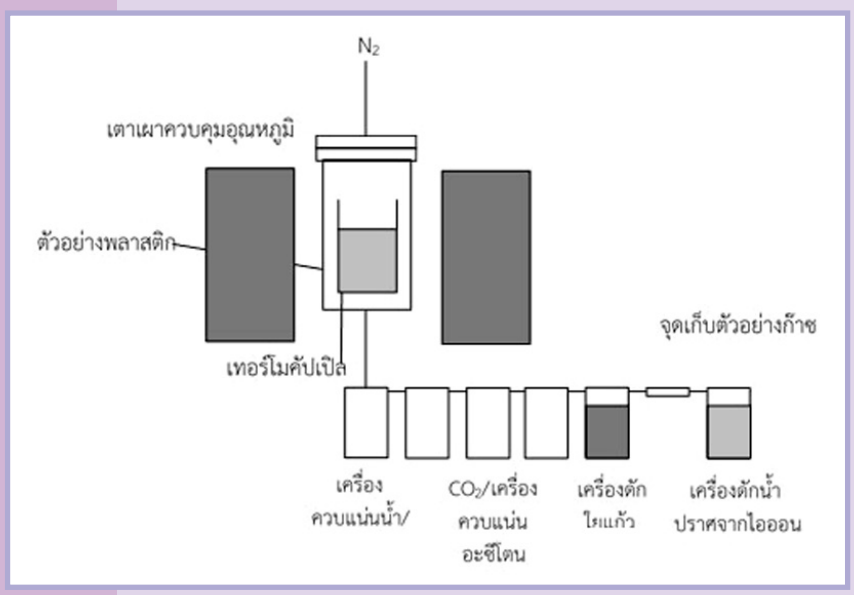
หน้าที่หลักของกระบวนการทำให้กลายเป็นก๊าซหรือก๊าซซิฟิเคชันในการจัดการซากพอลิเมอร์ คือการสังเคราะห์ก๊าซคาร์บอนอนนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และได้ผลิตภัณฑ์ทางอ้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ คือ คาร์-บอนไดออกไซด์ น้ำ มีเทน และเขม่า อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วงมากถึง 1,600 องศาเซลเซียส ที่ความดันมากถึง 150 บาร์ Yamawaki (2003) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการรีไซเคิลด้วยการทำให้เป็นก๊าซโดยใช้พลาสติกจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีส่วนประกอบของสารทนไฟที่ผสมโบรมีน ซึ่งผลของการศึกษานี้ ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการรีไซเคิลส่วนที่เป็นอโลหะจากซากวงจรพิมพ์ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษายังเป็นโมเดลในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันขนาดใหญ่เชิงพาณิชย์ต่อไปได้ด้วย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าหลังจากการบำบัดด้วยอุณหภูมิที่สูง 1,150 องศาเซลเซียสแล้ว การทำให้ก๊าซเย็นลงอย่างรวดเร็วจนเหลืออุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะช่วยลดการเกิดสารไดออกซินและฟิวแรนส์ได้มากกว่าการปล่อยไว้ให้เย็นลงเองถึง 2,300-4,300 เท่าซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBDD/Fs สามารถเกิดใหม่ในระหว่างที่ปล่อยให้อุณหภูมิเย็นลงอย่างช้าๆ ได้

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในกรณีที่มีการนำไปรีไซเคิล

เนื่องจากซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มีไฟเบอร์กลาสเป็นองค์ประกอบ ทำให้การเผาต้องใช้อุณหภูมิที่สูง และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก และสุดท้ายผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือเถ้าที่มีซิลิกา ยากต่อการนำไปใช้ประโยชน์ นอกจากนี้มีสารอันตรายในซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นองค์ประกอบ ทำให้มีความเสี่ยงอย่างมากต่อสุขอนามัยและสิ่งแวดล้อม เช่น แคดเมียม โครเมียม ปรอท และตะกั่ว อีกทั้งยังมีสารหน่วงไฟประเภทโบรมีน เช่น Tetrabromobisphenol A (TBBPA) ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Debromination/Hydrogenation ทำให้เกิดสารกลุ่มฟิวแรน และไดออกซิน รวมถึงก๊าซอันตรายจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น ไฮโดรเจนโบรไมด์ PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) และ Brominated PAHs

สำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบไพโรไลซีสเพื่อให้ได้น้ำมันมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ยังต้องมีการศึกษาในแง่ของคุณภาพของน้ำมันเพื่อให้ใช้ประโยชน์ได้จริง นอกจากนี้ ระหว่างทำการเผาไหม้นั้น จะเกิดสารอันตรายกลุ่ม Bromophenols เป็นหลัก และยังมีรายงานอีกว่าที่อุณหภูมิการเผาไหม้ที่แตกต่างกันจะเกิดสารอันตรายที่เป็นกลุ่ม Semivolatile ได้มากกว่าร้อยชนิด ดังรูปที่ 9 โดยสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและมีออกซิเจนจะทำให้เกิด ไฮโดรโบรไมด์ และ Brominated Light Hydrocarbon นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถเกิด Dibenzo-p-dioxins และ Furans ได้มากถึงระดับส่วนในล้านส่วน (ppm) อีกด้วย

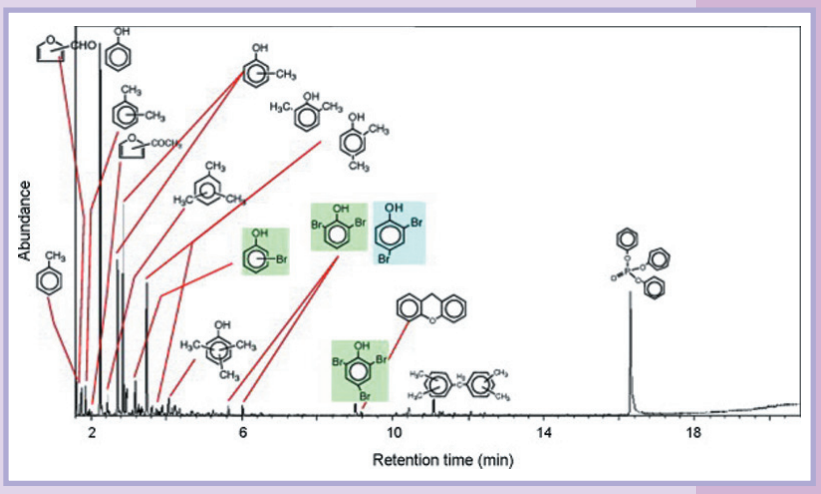
ส่วนกรณีการใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นในการได้มาซึ่งความร้อนและก๊าซนั้น อาจทำให้เกิดไดออกซินและฟิวแรนส์ และสารอื่นๆ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของไดออกซินและฟิวแรนส์ เช่น Polybrominated Biphenyls, Polybrominated Phenols, Polybrominated Biphenyl Ethers และTetrabromo Bisphenol A แต่อย่างไรก็ตาม หากมีการควบคุมที่ดีในด้วยการลดความร้อนของอากาศอย่างรวดเร็วหลังกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น จะสามารถลดปริมาณสารเหล่านี้ลงได้



รูปที่ 8 *แผนภาพลำดับขั้นของถังปฏิกิริยาการไพโรไลซีสภายใต้สภาวะสุญญากาศ*
*(**ที่มา:** ปรับจาก Hall และWilliams (2007))*

โดยส่วนใหญ่ NMP-PCB จะประกอบด้วย Thermosetting Resins หรือ Epoxy ไฟเบอร์กลาส พลาสติก จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์สำหรับการขึ้นรูปพลาสติกได้ แต่ก็มีข้อจำกัด เช่น ด้วยโครงสร้างของ Epoxy เป็นกลุ่มที่ไม่สามารถหลอมใหม่ได้ เป็นต้น นอกจากนี้มีการศึกษาที่นำส่วน NMP มาผสมกับพอลีโพรพิลีนพบว่ามีคุณสมบัติเป็นฉนวนเนื่องจากมีโบรมีนซึ่งเป็นสารหน่วงไฟเป็นส่วนประกอบ แต่

เมื่อนำมาศึกษาคุณสมบัติด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการทดสอบการชะของวัสดุพบว่า มีการปนเปื้อนทองแดงและตะกั่ว และยังพบว่ามีการปนเปื้อนโบรมีนอีกด้วย สำหรับเทคโนโลยีการรีไซเคิลซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ อย่างการสกัดด้วยวิธี Supercritical Fluid Extraction และ วิธี Chemical Extraction อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ในรูปของของเสียที่เกิดจากกระบวนการ และการสิ้นเปลืองพลังงาน อย่างไรก็ตามไม่มีรายงานถึงผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมจากวิธีการดังกล่าว



รูปที่ 9 *ของเสียจากกระบวนการไพโรไลซีส*
*(**ที่มา:** Hall และ Williams (2007))*

ข้อจำกัดในการนำซากแผงวงจรอิเล็คทรอนิกส์มาใช้ประโยชน์

จะเห็นได้ว่าในภาพรวมแล้วจะเกิดของเสีย 2 กลุ่มแรก คือ กลุ่มสารอินทรีย์ประเภทโลหะหนัก และกลุ่มสารอินทรีย์ที่มีธาตุฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ นอกเหนือจากกฎหมายด้านกากอุตสาหกรรมที่เป็นกลุ่ม HA (hazardous waste- absolute entry) ยังมีข้อตกลงระหว่างประเทศ ได้แก่ **อนุสัญญาสตอกโฮล์มว่าด้วยสารมลพิษตกค้างยาวนาน (Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants : POPs)** ซึ่งเป็นข้อตกลงระหว่างประเทศที่เกิดขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการปฏิบัติการร่วมระดับโลกอย่างเร่งด่วน ในการปกป้องสุขภาพอนามัยของคนและสิ่งแวดล้อมจากสารพิษตกค้างยาวนาน อนุสัญญา POPs มีจุดมุ่งหมายเพื่อคุ้มครองสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมจากสารมลพิษที่ตกค้างยาวนาน (POPs) ปัจจุบันนี้ สารเคมี POPs ที่ถูกกำหนดขึ้นมี 12 ชนิดคือ อัลดริน (aldrin) คลอเดน (chlordane) ดิลดริน (dieldrin) ดีดีที (DDT) เอนดริน (endrin) เฮปตะคลอร์ (heptachlor) เอชซีบี (hexachlorobenzene) ไมเร็กซ์ (mirex) ท็อกซาฟีน (toxaphene) พีซีบี (Poly chlorinated Biphenyls: PCBs) ไดออกซิน (Polychlorinated dibenzo-p-dioxins: PCDDs) และฟิวแรน (Polychlorinated dibenzofurans: PCDFs) สารเหล่านี้เป็นกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ซึ่งถูกย่อยสลายได้ยากโดยแสงหรือสารเคมี หรือโดยชีวภาพทำให้เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานานและสามารถเคลื่อนย้ายไปได้ไกลมาก และมีความเป็นพิษสูง สารดังกล่าวบางชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงระบบฮอร์โมน ทำลายระบบการสืบพันธุ์และระบบภูมิคุ้มกันได้ พันธกรณีสำคัญที่ภาคีต้องปฏิบัติได้แก่ การออกมาตรการทางกฎหมายและการบริหารในการห้ามผลิตและใช้สาร POPs 9 ชนิดแรก การควบคุมการนำเข้าและส่งออกสาร POPs การส่งเสริมการใช้สารทดแทน การกำหนดแนวทางด้านเทคนิคที่ดีที่สุด (Best Available Techniques: BAT) และแนวทางปฏิบัติทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ดีที่สุด (Best Environmental Practices: BEP) และประสานงานกับประเทศภาคี

อนุสัญญาสตอกโฮล์มบังคับให้ภาคีต้องจัดทำกลยุทธ์เพื่อจำแนกของเสียประเภทมลพิษตกค้างยาวนาน และจัดการกับของเสียเหล่านี้ด้วยวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ภายใต้ข้อตกลงที่จะลดการใช้สาร PCBs (Poly chlorinated Biphenyls) ที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเก็บประจุไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า ให้ได้ภายในปี พ.ศ. 2568 ทำให้อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องยังพอมีเวลาปรับตัวที่จะหาสาร PCB-free มาใช้แทนในอนาคต อย่างไรก็ดี ประเทศสมาชิกจะต้องหาหนทางหรือวิธีการที่จะกำจัดชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่มีสาร PCBs เป็นองค์ประกอบให้ถูกต้องตามหลักวิชาการและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ในประเทศ โดยต้องจัดเก็บซากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของสาร PCBs เป็นองค์ประกอบให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ ในปี พ.ศ. 2571

สำหรับประเทศกำลังพัฒนา ที่เป็นประเทศต้องเผชิญกับการจัดการสารมลพิษ PCBs ที่มีอยู่ในชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นปัญหาการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วยังต้องเผชิญกับการจัดการสารมลพิษที่มีอยู่ในขยะอิเล็กทรอนิกส์ด้วย ซึ่งต้องใช้เงินจำนวนมากในการรวบรวมชิ้นส่วน ตลอดจนการให้ความรู้ความเข้าใจแก่กลุ่มบุคคลที่เกี่ยวข้องกับการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังคงมีความกังวลในเรื่องสารมลพิษตกค้างยาวนาน โดยเฉพาะสารกลุ่ม Dioxins และ Furans เป็นสารกลุ่มมีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นสารมลพิษที่รุนแรงที่สุดในบรรดารายการสารมลพิษ POPs จึงทำให้การนำมาเป็นพลังงานหรือการย่อยสลายด้วยความร้อนมีข้อจำกัด

นอกเหนือจากกฎหมายและข้อตกลงที่กล่าวข้างต้น ยังมีปัจจัยอื่นที่ทำให้การใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็คทรอนิกส์ (ส่วนอโลหะ) ยังไม่ได้มีการพัฒนาสู่การรีไซเคิลได้อย่างเต็มรูปแบบ โดยศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (2553) ศึกษาการจัดการซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน พบว่ายังไม่ก้าวหน้ามากนัก คืออยู่ในระดับของการสกัดแยกโลหะมีค่า(โดยผู้ประกอบการชาวไทย)ออกจากซากอิเล็กทรอนิกส์และมีระบบควบคุมการเกิดมลพิษ ด้วยวิธีการและขั้นตอนการสกัดแยก รวมถึงเทคโนโลยีการบำบัดสารอันตรายของซากอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน มีการลงทุนที่ไม่มากนัก และส่วนใหญ่ยังไม่มีกระบวนการจัดการอย่างเต็มรูปแบบ จึงอาจเกิดการปนเปื้อนของสารอันตรายหรือแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ ทั้งนี้การจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ต้องใช้เงินลงทุนสูง ประกอบกับผู้ประกอบการที่มีศักยภาพในการรีไซเคิลนั้นเป็นชาวต่างชาติ และยังไม่มีการเข้ามาดำเนินการด้านการรีไซเคิลในประเทศไทยอย่างเต็มรูปแบบ ซึ่งอาจเป็นเพราะข้อกำหนดและกฎหมายบางฉบับของไทย รวมถึงการยอมรับการจัดการซากจากภาคประชาชน ทำให้ไม่คุ้มค่าการลงทุน หากภาครัฐมีการผลักดันให้เกิดกฎหมายระเบียบ หรือข้อบังคับในการจัดเก็บและรวบรวมซากอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพ ก็สามารถทำให้ของเสียสามารถเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมอื่นๆได้ อีกทั้งเป็นการลดการฝังกลบ และการจัดการอย่างผิดวิธี นอกจากนี้ผู้ประกอบการมีความเชื่อมั่นที่จะลงทุนในอุตสาหกรรมคัดแยกซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เกิดการแข่งขันและสร้างกลไกทางการตลาดของกลุ่มธุรกิจการรีไซเคิลอย่างจริงจัง ก็จะทำให้เกิดการพัฒนาของระบบและกระบวนการรีไซเคิลที่ดีและมีประสิทธิภาพได้

❖ ❖ ❖ ❖ ❖

บรรณานุกรม

1. กรมควบคุมมลพิษ. (2558, กรกฎาคม). *รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย* 2558. [pdf]. สืบค้นจาก http://infofile.pcd.go.th/mgt/ThailandPollut2558_Form.pdf?CFID=350728&CFTOKEN=65309457
2. เปรมฤดี กาญจนะปิยะ. (2554). *E-waste เทคโนโลยีการจัดการซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์.* ปทุมธานี:ศูนย์ความเป็นเลิศเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
3. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2554). *คู่มือหลักปฏิบัติที่ดีสำหรับการให้บริการบำบัด กำจัดกากอุตสาหกรรม.* [pdf]. สืบค้นจาก http://www2.diw.go.th/iwmb/form/factory1.pdf
4. ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย. (2553). *โครงการศึกษาหลักเกณฑ์ วิธีการ เงื่อนไข และอัตราการจัดเก็บค่าธรรมเนียมการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.* กรุงเทพฯ.
5. Huang, K., Guo, J., Xu, Z. (2009). Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials,* 164, 399–408.
6. Guo, J., Li, J., Rao, Q., Xu, Z. (2008). Phenolic Molding Compound Filled with Nonmetals of Waste PCBs. *Environmental Science & Technology,* 42 (2), 624-628.
7. Mou, P., Xiang, D., Duan, G. (2007). Products Made from Nonmetallic Materials Reclaimed from Waste Printed Circuit Boards. *Tsinghua Science & Technology,* 12, 276–283.
8. Niu, X., Li, Y. (2007). Treatment of waste printed wire boards in electronic waste for safe disposal. *Journal of Hazardous Materials,* 145 (3), 410–416.
9. Chien, Y.C., Wang, H.P., Lin, K.S., Yang, Y.W. (2000). Oxidation of printed circuit board wastes in supercritical water. *Water Research,* 34, 4279–4283.
10. Yamawaki, T. (2003). The gasification recycling technology of plastics WEEE containing brominated flame retardants. *Fire Material,* 27, 315–319.
11. Zhu, P., Chen, Y., Wang, L., Zhou, M., Zhou, J. (2013). Dimethyl Sulfoxide Separating Waste Printed Circuit Boards by Dissolving Polymer Materials, *Journal of Environmental Engineering,* 139 (8), 1128-1131.
12. Hall, W.J., Williams, P.T. (2007). Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling,* 51 (3), 691-709. ISSN 0921-3449.