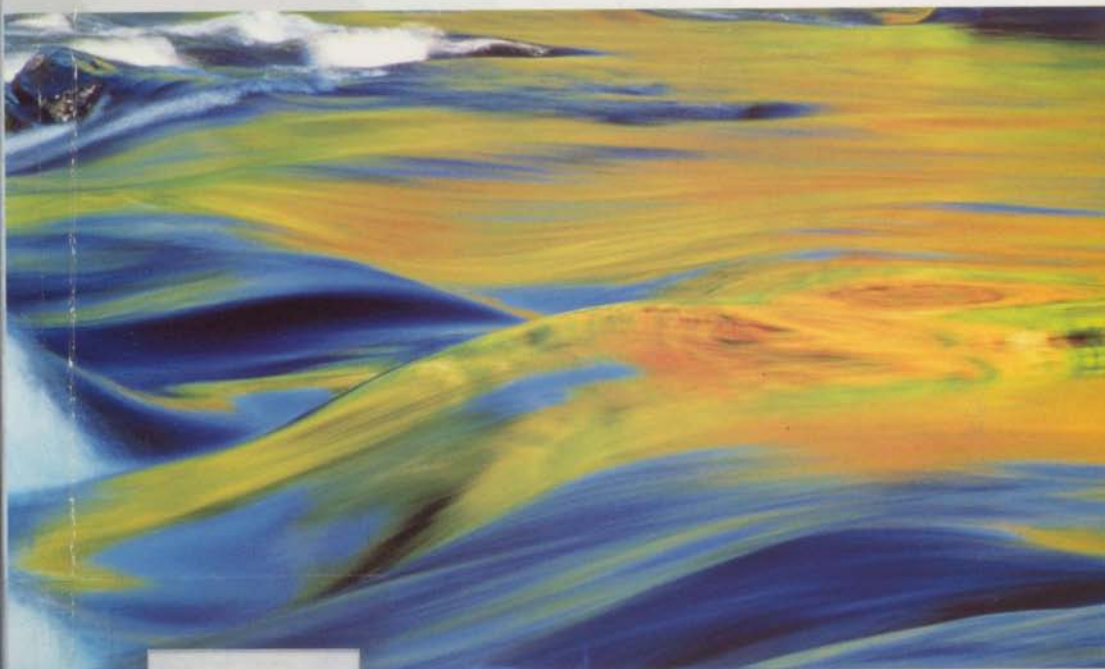


เรารักโลก
We love the Earth



GREEN CHEMISTRY

เคมีสีเขียว



สวทช.

สก.8

0036

2547

ฉ.1



เรารักโลก

We love the Earth

เคมีสีเขียว

GREEN CHEMISTRY

TECHNICAL INFORMATION ACCESS CENTER

ศูนย์บริการสารสนเทศทางเทคโนโลยี



คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ร่วมกับ

โครงการสร้างความเข้าใจวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแก่สาธารณชน
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เรารักโลก: เคมีสีเขียว

ผู้เขียนเรียบเรียง: ดร.ดวงกมล นันทศรี

ISBN: 974-229-594-8

พิมพ์ครั้งที่ 1: มีนาคม 2547

จำนวนพิมพ์ 2,000 เล่ม

สงวนลิขสิทธิ์

ฉวทช.

สค.ช

0036

2547

ผ.1



จัดทำและเผยแพร่โดย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพมหานคร 10330

โทรศัพท์ 0-2218-7622

ร่วมกับ

โครงการสร้างความเข้าใจวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแก่สาธารณชน

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย

เลขที่ 111 ถนนพหลโยธิน

คลองหนึ่ง คลองหลวง

ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์ 0-2564-7000 ต่อ 1401, 1402, 1403 โทรสาร 0-2564-7060

Reduce ! Reuse !
Recycle !



เกริ่นนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมนับวันจะเป็นปัญหาหลักอย่างหนึ่งของโลกในศตวรรษที่ 21 เพื่อให้เยาวชนตระหนักถึงความสำคัญในการร่วมมือกันรักษา และปรับปรุงสภาพแวดล้อมให้อยู่ในภาวะที่ดีตลอดไป เพื่อประโยชน์ของมนุษยชาติโดยรวม

ดังนั้นสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติร่วมกับคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการปลูกจิตสำนึกของบุคคลทุกฝ่าย โดยเฉพาะนักเรียน นักศึกษาและเยาวชนไทย ในการให้ความร่วมมือกันรักษาสิ่งแวดล้อมในลักษณะครบวงจรและยั่งยืน นั่นคือการพิจารณาตั้งแต่กระบวนการผลิตที่จะไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม หรือมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ตลอดจนการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการหมุนเวียนไปใช้ประโยชน์อื่นๆ

เอกสารเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ความรู้เบื้องต้นและข้อมูลพื้นฐาน เพื่อให้ได้ภาพโดยรวมเกี่ยวกับ “เคมีสีเขียว” ซึ่งเคมีสีเขียวถือเป็นกุญแจหลักในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ต้นเหตุ ซึ่งหวังว่าเอกสารเล่มนี้จักเป็นประโยชน์สำหรับเยาวชนเพื่อให้มีแนวคิด แนวทางปฏิบัติ และตระหนักถึงความสำคัญในการร่วมมือกันรักษาสิ่งแวดล้อมให้คงสภาพที่ดีสืบต่อไป

มีนาคม 2547



สารบัญ

ที่มาของเคมีสีเขียว	9
เคมีสีเขียวคืออะไร	11
กฎแห่งความคิดของเคมีสีเขียว	12
หลักเศรษฐศาสตร์ทางอะตอม	15
หลักการของเคมีสีเขียว	18
เคมีสีเขียวกับการพัฒนาอุตสาหกรรม	24
ภาคผนวก	29

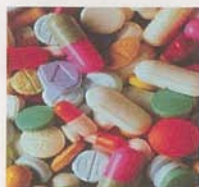


GREEN CHEMISTRY

เคมีสีเขียว

ที่มาของเคมีสีเขียว

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าเคมีมีบทบาทสำคัญสามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ในหลายๆ ด้านโดยเฉพาะปัจจัยสี่ เช่น มีการพัฒนาเทคโนโลยีอาหารและอุตสาหกรรมเกษตร เทคโนโลยีสิ่งทอ พอลิเมอร์ในหลายรูปแบบ (เส้นใย พลาสติก และยาง) เทคโนโลยีการผลิตยารักษาโรค เทคโนโลยีชีวภาพ เทคโนโลยีการผลิตวัสดุอุปกรณ์สิ่งก่อสร้างที่ทันสมัย รวมถึงเทคโนโลยีเชื้อเพลิง เป็นต้น เนื่องจากการเจริญขึ้นทางด้านต่างๆ เหล่านี้ ส่งผลให้อายุเฉลี่ยของมนุษย์เพิ่มขึ้นจาก 47 ปีในปี ค.ศ.1900 เป็น 75 ปีในปี ค.ศ.1990



แม้ว่าเคมีนำมาซึ่งคุณประโยชน์ และส่งผลให้มนุษย์มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น แต่ในสิ่งดีนั้นก็ก็มีบางอย่างแฝงมาทำให้เราต้องระมัดระวัง หนึ่งในนั้นคือสารพิษที่มนุษย์อุปโภค-บริโภคในชีวิตประจำวัน ตัวอย่างเช่น สารไดออกซินที่ปนเปื้อนในน้ำดื่ม สารพวกไนโตรไซเอมีนในเนื้ออย่างที่ไม่หมักเกลือ ซึ่งจัดเป็นสารก่อมะเร็ง รวมถึงความเป็นพิษของยาฆ่าแมลง และยารักษาโรค บางชนิดที่มีผลข้างเคียงทำให้อายุของมนุษย์สั้นลงกว่าที่ควรจะเป็นไม่เพียงแต่สารที่มนุษย์ผลิตขึ้นเท่านั้นที่เป็นอันตราย

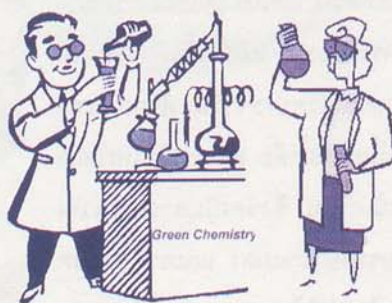


สารเคมีที่มีอยู่ตามธรรมชาติก็มีความเป็นพิษเช่นกัน ตัวอย่างสารแอลฟา ทอกซิน (Aflatoxin) ที่เกิดจากเชื้อราในถั่วลิสง สารเทโทรโดทอกซิน (tetrodotoxin) ที่เกิดจากการเตรียมปลาดิบซึ่งนิยมนำมาเป็นอาหารที่ผิดวิธี สารสกัดจากรากของ ต้นซาซซาฟรา (Sassafras) ที่นำมาใช้เป็นสารปรุงแต่งกลิ่นรูเบียร์ ต้องสกัดสารซาโฟร (Safrole) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งออกก่อน

แม้ว่าผลิตภัณฑ์หลายอย่างเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำรงชีวิต สารเคมีรวมถึง กระบวนการผลิตอาจส่งผลร้ายต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตได้โดยตรง



เมื่อไม่นานมานี้ความ เป็นพิษของสารเคมีที่ใช้บาง ประเภทเริ่มส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมชัดเจนขึ้น เป็นผล ให้นักวิทยาศาสตร์และวิศวกร ร่วมมือกันศึกษาองค์ความรู้ ใหม่ในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ ระบบที่สะอาด ปลอดภัย และประหยัดพลังงาน มากกว่า วิธีการผลิตเดิม ดังนั้นการศึกษาทางเคมีจึงมีบทบาทสำคัญใน การใช้เป็นเครื่องมือชี้แนะเพื่อให้เกิดความร่วมมือกัน ระหว่างการพัฒนาเทคโนโลยีที่ยั่งยืนควบคู่ไปกับการรักษา สภาพแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตให้คงอยู่สืบต่อไป



จากแนวคิดนี้จึงเป็นแรงผลักดันให้เกิดการศึกษากระบวนการทางเคมีสีเขียว (Green Chemistry)

เคมีสีเขียวคืออะไร

เคมีสีเขียว คือการนำหลักการทางเคมีมาออกแบบพัฒนากระบวนการสังเคราะห์สารเคมี และผลิตภัณฑ์เคมี เพื่อลดหรือละเว้นการใช้และการเกิดขึ้นของสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม โดยอาศัยหลักการทางเคมีเป็นตัวผสานกันระหว่าง การรักษาสีสิ่งแวดล้อมและหลักการทางเศรษฐศาสตร์ ปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันไม่ได้พบเพียงแคในท้องปฏิบัติการและหน่วยวิจัยเท่านั้น แต่ส่งผลถึงปัญหาสังคมโลกโดยรวม เช่นการแปรเปลี่ยนไปของสภาพภูมิอากาศ การใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง และการจัดการกับแหล่งน้ำ



เคมีสีเขียว จัดเป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหา เพราะเป็นการเริ่มพิจารณาตั้งแต่ระดับอะตอมของสารตั้งต้นที่ใช้และสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการนำไปใช้ เป็นการปรับปรุงขั้นตอน หรือวิธีการผลิตใหม่ รวมทั้งออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อลดการเกิดสารพิษให้น้อยลง หรือให้หมดไปจากกระบวนการผลิต หรือลดการใช้และผลิตสารพิษตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต รวมถึงหลังจากการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์แล้ว

เคมีสีเขียว มีวัตถุประสงค์เพื่อการกำจัดมลพิษโดยการป้องกันจากแหล่งกำเนิด ในการออกแบบปฏิกิริยาตามหลักของเคมีสีเขียว นั้น นักเคมีต้องตระหนักถึงความเป็นพิษที่อาจเกิดขึ้นกับสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ก่อนที่จะนำสารเคมีนั้นมาใช้ในการกระบวนการผลิต หรือการเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน โดยการเลือกใช้สารที่ไม่มีความเป็นพิษหรือเป็นพิษน้อยที่สุด

กฎแห่งความคิดของการออกแบบปฏิกิริยาเคมีสีเขียว ประกอบด้วยด้วย

- **ปลอดภัยไว้ก่อน** โดยเริ่มจากการใช้สารที่ไม่เป็นอันตรายในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการลดอันตรายที่เกิดขึ้นกับคนงานในโรงงานและยังเป็นการป้องกันอุบัติเหตุจากการรั่วซึมหรือการระเบิดของสารพิษสู่สิ่งแวดล้อม เช่นในกระบวนการสังเคราะห์กรดอะดิปิก (adipic acid) เป็นสารเคมีที่เป็นความต้องการของตลาดเกือบ 2 พันล้านกิโลกรัมต่อปีสำหรับใช้ผลิตไนลอน พอลิยูรีเทน สารหล่อลื่น และพอลิเมอร์อีกหลายชนิด วิธีการที่ใช้ทั่วไปเริ่มจากการใช้เบนซีนเป็นสารตั้งต้น ซึ่งเบนซีนเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวิธีการผลิตใหม่โดยใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นสารตั้งต้นแทนการใช้เบนซีนและใช้แบคทีเรีย *E.coli* เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นั่นก็คือการลดปริมาณการใช้สารที่เป็นอันตรายเช่นเบนซีนลง



- **เลือกใช้วัตถุดิบชนิดที่หมุนเวียนได้** ควรใช้วัตถุดิบที่มาจากพืชมากกว่าวัตถุดิบจากสารปิโตรเคมี และก๊าซธรรมชาติที่จัดเป็นสารเคมีชนิดสิ้นเปลืองหรือใช้แล้วหมดไปไม่สามารถสร้างขึ้นมาทดแทนและหมุนเวียนใช้งานได้ในเวลาอันสั้น ในกระบวนการผลิตกรดอะดิปิกเริ่มจากการใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น ซึ่งได้จากวัตถุดิบจำพวกแป้งข้าวโพด ลำต้นหรือก้านของพืช ในขณะที่เมื่อใช้เบนซีนเป็นสารตั้งต้น ซึ่งจัดเป็นสารเคมีชนิดสิ้นเปลืองที่ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี หรือในกระบวนการผลิตโฟมกันกระแทกที่ใช้แป้งข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ แทนการใช้สารเคมีจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

- **ใช้ตัวทำละลายที่ปลอดภัย** ลดการใช้ตัวทำละลายที่เป็นพิษต่อสุขภาพหรือก่อให้เกิดอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรม ตัวทำละลายที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิดที่เป็นพิษเช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ คลอโรฟอร์ม เป็นต้น จึงควรหันมาใช้ตัวทำละลายที่ปลอดภัยกว่าเช่น น้ำ หรือ คาร์บอนไดออกไซด์เหลว ตัวอย่างเช่น กระบวนการซักแห้งแบบใหม่โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็นตัวดึงคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกออกจากเนื้อผ้าแทนการใช้เพอร์คลอโรเอทิลีนซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม



- **การใช้อะตอมอย่างมีคุณค่า** ควรออกแบบปฏิกิริยาให้มีจำนวนอะตอมของสารตั้งต้นเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุดหรือทั้งหมด โดยไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการหรือให้น้อยที่สุด ดังตัวอย่างในปี 1990 มีการผลิตยาบรรเทาอาการปวด Ibuprofen โดยผ่านกรรมวิธีการผลิต 3 ขั้นตอนโดยจำนวนอะตอมของสาร Ibuprofen ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น 77% ในขณะที่กระบวนการเดิมที่ใช้ผลิตตั้งแต่ปี 1965 ผ่านกรรมวิธีการผลิต 6 ขั้นตอนทำให้ Ibuprofen เกิดเพียงแค่ 40% ส่วนอีก 60% เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ไม่ต้องการและเป็นของเสียที่ต้องกำจัดทิ้งไป (รายละเอียดการสังเคราะห์ในภาคผนวก) วิธีการผลิตแบบใหม่นี้เป็นการลดปริมาณขยะและเพิ่มคุณภาพในการผลิตเป็นอย่างดี



ตัวอย่างยา Ibuprofen ที่วางขายทั่วไป

- **ใช้พลังงานให้น้อยลง** ลดการใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยาให้น้อยลง เช่นบางปฏิกิริยาสามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังเกิดการหมุนเวียนใช้ในปฏิกิริยาได้ และช่วยให้ใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง หรืออาจใช้พลังงานจากแหล่งอื่น เช่น พลังงานแสง ลม ไฟ ทดแทนพลังงานแบบสิ้นเปลือง ที่ใช้แล้วหมดไป เช่นพลังงานเชื้อเพลิง
- **คีนสารที่ปลอดภัยสู่ธรรมชาติ** ควรออกแบบผลิตภัณฑ์ให้สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเมื่อสัมผัสกับแสงสว่างหรือย่อยสลายโดยแบคทีเรีย เปลี่ยนเป็นสารที่ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลิตภัณฑ์พวกนี้จะช่วยลดปริมาณของกองภูเขาขยะลงได้ ดังตัวอย่างการใช้โฟมกันกระแทกที่ทำจากแป้งข้าวโพด หลังการใช้งานโฟมนั้นสามารถละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นการช่วยให้แบคทีเรียย่อยสลายแป้งได้ดีกว่าการใช้โฟมที่ผลิตจากพอลิเมอร์พวกพอลิสไตรีน แนวทางการออกแบบกระบวนการผลิตโดยปฏิกิริยาแบบเคมีสีเขียว นั้นไม่เพียงแต่ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมเพียงอย่างเดียว ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายของบริษัทในการประหยัดพลังงานและการจัดการกับของเสียและมลพิษ



หลักเลี่ยงการเกิดขยะโดยการใชหลักเศรษฐศาสตร์ทางอะตอม (Atom Economy)

แนวคิดแบบเคมีสีเขียวคือการลดมลพิษที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนอะตอมของผลิตภัณฑ์ต่ออะตอมของสารตั้งต้นต่ำจะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง หรือสารที่ไม่ต้องการขึ้นในกระบวนการผลิตมาก เป็นการใชสารตั้งต้นอย่างสิ้นเปลือง อีกทั้งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีราคาแพงขึ้น ในขณะที่นักเคมีมักใช้ ร้อยละผลได้ (% yield) เป็นเกณฑ์ในการวัดประสิทธิภาพของปฏิกิริยา โดยไม่คำนึงถึงจำนวนอะตอมที่ใชของสารตั้งต้นและจำนวนอะตอมของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น การออกแบบวิธีการสังเคราะห์โดยพิจารณาหลักการใช้อะตอมอย่างมีคุณค่านี้เป็นการหลักเลี่ยงการเกิดขยะโดยการออกแบบปฏิกิริยาให้ปฏิกิริยามีการใช้อะตอมอย่างมีคุณค่าสูงสุด



สวทศ.

สท.8

0036

2542

จ.1.



Prof. Barry M. Trost ได้เสนอสูตร

คำนวณค่าเศรษฐศาสตร์ทางอะตอม (Atom Economic) ไว้ดังนี้

% ค่าเศรษฐศาสตร์ทางอะตอม = $\frac{\text{มวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ}}{\text{มวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}$ x 100
หรือ

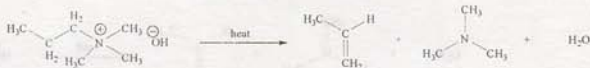
% ค่าเศรษฐศาสตร์ทางอะตอม = $\frac{\text{มวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ}}{\text{มวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}$ x 100

ในขณะ

% ผลได้ = $\frac{\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้}}{\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ควรได้ตามทฤษฎี}}$ x 100

ตัวอย่างการเตรียมโพพีน (C_3H_6) มีวิธีการเตรียมได้หลายวิธีดังนี้

วิธีที่ 1 เตรียมจากไตรเมทิลโพพิลเอมีน (trimethylpropylamine) เมื่อให้ความร้อนได้โพพีนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และมีไตรเมทิลเอมีน (trimethylamine) กับน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง

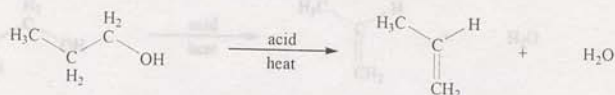


	ไตรเมทิลโพพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์	โพพีน	ไตรเมทิลเอมีน	น้ำ
สูตรอย่างง่าย	$C_6H_{16}N^+OH^-$	C_3H_6	C_3H_9N	H_2O
มวลโมเลกุล	119	42	59	18

% ค่าเศรษฐศาสตร์ทางอะตอม = $(42 / 119) \times 100 = 35$

หรือ = $(42 / (42 + 59 + 18)) \times 100 = 35$

วิธีที่ 2 เตรียมจาก 1-โพรพานอล (1-propanol) เมื่อให้ความร้อนในขณะที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โพรพีนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเพียงชนิดเดียว



	1-โพรพานอล	โพรพีน	น้ำ
สูตรอย่างง่าย	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	C_3H_6	H_2O
มวลโมเลกุล	60	42	18

$$\% \text{ ค่าเศรษฐกิจสารตั้งทางอะตอม} = (42 / 60) \times 100 = 70$$

$$\text{หรือ} = (42 / (42 + 18)) \times 100 = 70$$

การเตรียมโพรพีนจาก 1-โพรพานอล ตามวิธีที่ 2 เป็นแนวทางแบบเคมีสีเขียวซึ่งไม่เกิดไทรเมทิลเอมีนเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง และ ค่าเศรษฐกิจสารตั้งทางอะตอมมีค่าสูงกว่าวิธีการเตรียม โพรพีนจากไทรเมทิลโพรพิลเอมีนจาก วิธีที่ 1



หลักการของเคมีสีเขียว

ที่สำคัญมี 12 ประการ คือ

1. การป้องกัน

(Prevention)

การป้องกันไม่ให้เกิดสารพิษตั้งแต่ต้นเป็นการดีกว่าการทำความสะอาดหรือบำบัดของเสียที่ขั้นตอนสุดท้าย



2. การใช้อะตอมอย่างมีคุณค่า

(Atom Economy)

การออกแบบผลิตภัณฑ์หรือวิธีการผลิต ควรคำนึงถึงการใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตไปจนถึงการได้ผลิตภัณฑ์ออกมา โดยอาศัยหลักการคำนวณค่าเศรษฐศาสตร์ทางอะตอม

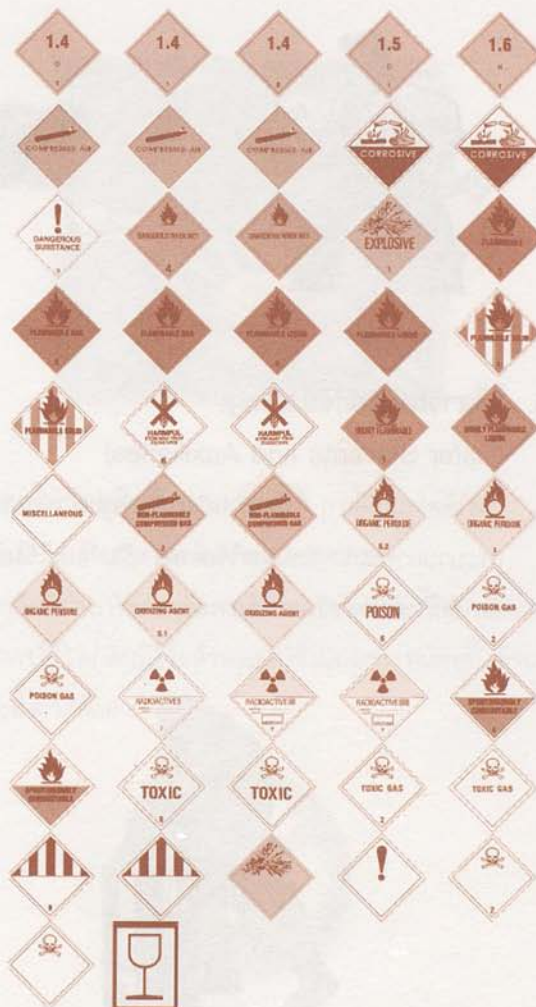


เขียนโดย Pual T. Anastas และ John C. Warner

3. เลือกการสังเคราะห์แบบเป็นอันตรายน้อย

(Less Hazardous Chemical Synthesis)

ในทางปฏิบัติ ถ้าสามารถออกแบบวิธีการสังเคราะห์สาร ควรคำนึงถึงสารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์ว่าต้องไม่มีความเป็นพิษหรือมีเพียงเล็กน้อยต่อสุขภาพของมนุษย์ และต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม



4. ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัย

(Designing Safer Chemicals)

การออกแบบผลิตภัณฑ์ทางเคมี ควรเน้นประสิทธิผลของการนำไปใช้งาน
ร่วมกับการลดมลพิษด้วย



5. ใช้สารเคมีอย่างประหยัด

(Safer Solvents and Auxiliaries)

การใช้สารเคมีอื่นๆ ที่เป็นส่วนประกอบ เช่น ตัวทำละลาย สารที่ใช้ใน
กระบวนการแยก ฯลฯ ควรใช้เท่าที่จำเป็น และใช้ในปริมาณที่น้อยมาก
นัก อีกทั้งระมัดระวังการใช้สารอันตราย



6. ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

(Design for Energy Efficiency)

ควรใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานในกระบวนการผลิต ทั้งนี้เพื่อให้มีผลสัมฤทธิ์ทั้งด้านเศรษฐกิจศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป โดยเน้นกระบวนการสังเคราะห์ที่ใช้อุณหภูมิและความดันไม่สูงมากนัก



7. เลือกใช้วัตถุดิบที่หมุนเวียนได้

(Use of Renewable Feedstocks)

วัตถุดิบที่นำมาใช้ควรเลือกชนิดที่หมุนเวียนได้ หรือนำกลับมาใช้ได้อีก ไม่ควรใช้วัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดไปซึ่งมีผลกระทบต่อทั้งด้านเศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม



8. ลดการใช้อนุพันธ์

(Reduce Derivatives)

ถ้าเป็นไปได้ควรหลีกเลี่ยงการใช้อนุพันธ์ที่ไม่จำเป็น เช่นไม่ใช้สารที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันสารชนิดนั้นก็จะมีเพิ่มผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ไม่ต้องการ



9. การเร่งปฏิกิริยา

(Catalysis)

ควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (เลือกชนิดที่มีความเลือกจำเพาะต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสูง) ดีกว่าการใช้สารเคมีที่เกิดปฏิกิริยาตามหลักมวลสารสัมพันธ์ ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถลดการใช้สารตั้งต้นในกระบวนการผลิตได้



10. ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้

(Design for Degradation)

สารเคมีที่เป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตจะต้องออกแบบ เพื่อไม่ให้ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมนานเกินไป และจะต้องสลายตัวได้ตามธรรมชาติ เป็นสารโมเลกุลเล็ก ๆ ที่ไม่เป็นอันตรายซึ่งเรียกผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ว่า ECO-DESIGN



11. ตรวจสอบกระบวนการผลิตเพื่อป้องกันมลพิษ

(Real-time Analysis for Pollution Prevention)

ควรพัฒนาวิธีวิเคราะห์สารในระยะเวลาที่กำลังดำเนินการผลิต เพื่อเฝ้าระวังและติดตามการเกิดสารอันตราย หรือสารพิษที่อาจเกิดขึ้นได้



12. ป้องกันอุบัติเหตุโดยเลือกใช้สารเคมีที่ปลอดภัย

(Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention)

ชนิดและรูปแบบของสารเคมีที่นำมาใช้ในกระบวนการทางเคมี ควรเลือกอย่างดีเพื่อลดหรือหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุจากการระเบิด การติดไฟ ไหม้ไฟ หรือปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม



การใช้เคมีสีเขียวในอุตสาหกรรมเคมีจะเน้นความสำคัญที่กระบวนการผลิตและสารผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยเน้นถึงการกำจัดหรือลดปริมาณกากของเสียและสารพิษอันตรายต่างๆ ให้น้อยลง ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการนำเคมีสีเขียวไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างจริงจัง หลังจากได้มีการออกกฎหมายป้องกันมลพิษสิ่งแวดล้อมเมื่อปี 1990 (Pollution Prevention Act 1990)



จากนั้นในปี 1991 ทาง EPA (Environmental Protection Agency) จึงได้นำเคมีสีเขียวไปใช้ในทางปฏิบัติอย่างเป็นรูปธรรม

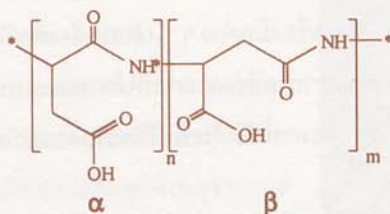
กฎหมายป้องกันมลพิษสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกาฉบับนี้ มีเนื้อหาที่มุ่งเน้นให้มีการกระตุ้นภาคอุตสาหกรรม และภาคการศึกษาในการสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ เพื่อใช้เทคโนโลยีหรือเครื่องมือต่างๆ ในการหลีกเลี่ยง ละเว้น หรือลดการเกิด หรือการใช้สารพิษอันตราย ตลอดจนสารที่ได้จากกระบวนการผลิต ควรนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ และสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ควรสลายตัวได้ตามธรรมชาติ



ในปัจจุบันได้มีความร่วมมือกันอย่างดีระหว่างภาครัฐบาล ภาคการศึกษา และภาคอุตสาหกรรม ดังตัวอย่าง การผลิตสารทาเคลือบใต้ท้องเรือของบริษัท Rohm and Hass เพื่อป้องกันเพรียง สาหร่าย และพืชน้ำมาเกาะ สารที่พัฒนานี้ขึ้นชื่อ 4,5-dichloro-2-n-octyl-4-isothiazolin-3-one (DCOI)

หรือมีชื่อทางการค้าว่า Sea-nine 211 ซึ่งไม่เป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในท้องทะเล และสามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้อย่างรวดเร็วเมื่อหลุดจากท้องเรือ เป็นสารที่ใช้ทดแทน tributyltin (TBT) ที่เคยใช้อยู่เดิม ซึ่งพบว่าเป็นพิษสะสมในสัตว์น้ำเป็นเวลานานและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศโดยรวม

ตัวอย่างที่สองบริษัท DONLAR ผลิตพอลิเมอร์ชนิดใหม่คือ Thermal Polyaspartate (TPA)

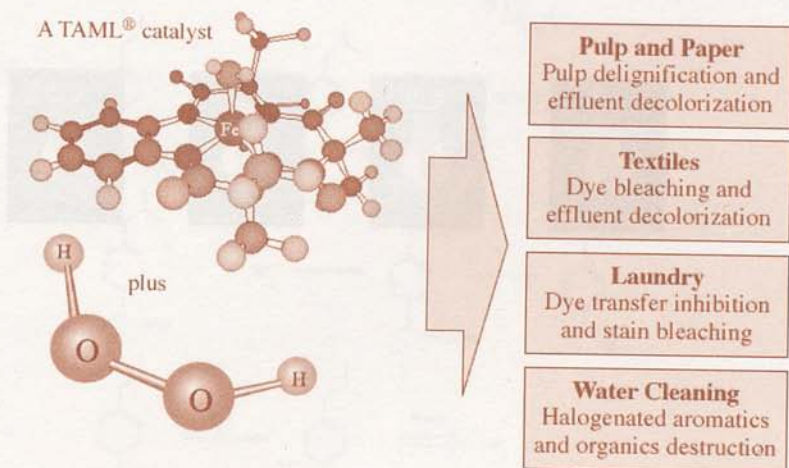


Poly- α , β -D,L-aspartate

ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้โดยไม่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ และเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในกระบวนการผลิตน้อยมาก อีกทั้งยังมีสมบัติการถูกย่อยสลายตามธรรมชาติได้รวดเร็ว และไม่หลงเหลือสารที่เป็นละอองของพอลิเมอร์ตกค้างเช่นเดียวกับ Polyacrylate (PAC) ในขณะที่ TPA สามารถนำมาใช้งานมีสมบัติที่ดัดเทียบกับ PAC นอกจากนี้บริษัท DONLAR ยังผลิตสารทางเคมีการเกษตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารในดินให้กับต้นพืช หลายชนิด เช่นสารมีชื่อทางการค้าว่า Amisorb เป็นสารเคมีที่ไม่หลงเหลือพิษตกค้างในธรรมชาติ และยังเป็นการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรอีกทางหนึ่งด้วย



ส่วนทางภาคการศึกษาได้มีการศึกษาวิจัยทางเคมีสีเขียวอย่างกว้างขวาง เช่นที่ Mellon University ได้พัฒนาระบบของปฏิกิริยาออกซิเดชัน ให้เกิดปฏิกิริยารวดเร็ว เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและพลังงาน อีกทั้งเป็นการทดลองที่ไม่ยุ่งยากรวมถึง ภาวะที่เกิดปฏิกิริยาไม่รุนแรงคืออุณหภูมิและความดันที่ไม่สูงนัก และการทดลอง สามารถปฏิบัติได้จริงในขนาดขนาดเล็กเพื่อเป็นการประหยัดสารเคมีที่ใช้ทดลอง นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อสรุปจากงานวิจัยไปประยุกต์ได้จริงในอุตสาหกรรม กระบวนการฟอกสีกระดาษ เป็นการพัฒนากรรมวิธีการผลิตที่ใช้ Tetraamido-Macrocyclic ligand (TAML) เป็นตัวเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อทดแทนการใช้กรรมวิธีเดิมที่ต้องใช้สารเคมีซึ่งมี คลอรีนเป็นองค์ประกอบทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ในระบบซึ่งมีผลเสียต่อสุขภาพ มนุษย์และสิ่งแวดล้อม



จากข้อมูลและตัวอย่างสามารถสรุปได้ว่า

“ Green Chemistry Solutions can be found ”

“ คำตอบทางเคมีสีเขียวสามารถพบได้ ”

“ Green Chemistry can be economically viable ”

“ เคมีสีเขียวสนับสนุนการพัฒนาทางเศรษฐกิจ ”

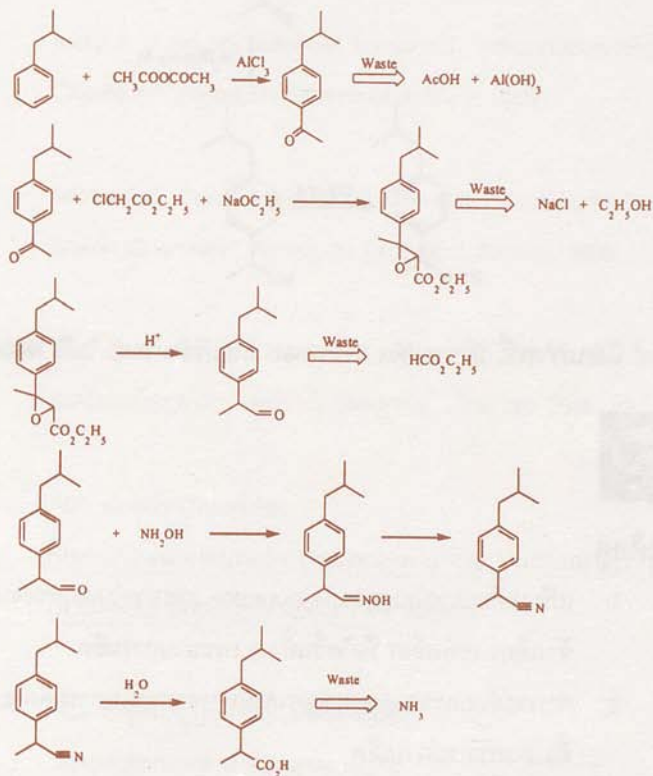
“ Green Chemistry is the key to human health and environmental protection ”

“ เคมีสีเขียวเป็นกุญแจสำคัญต่อสุขภาพมนุษย์ชาติและการป้องกันสิ่งแวดล้อม ”



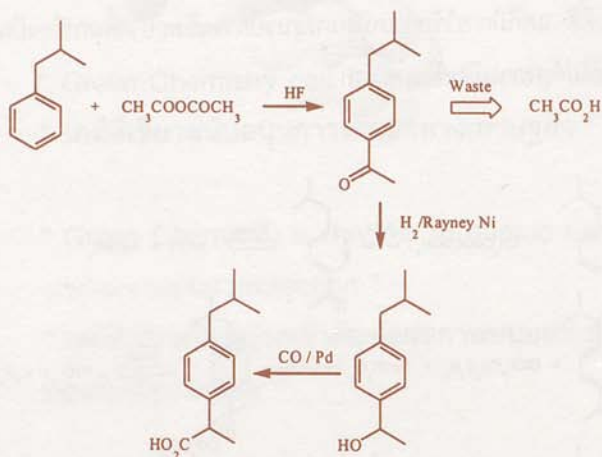
ภาคผนวก

ตัวอย่างการใช้หลักเศรษฐศาสตร์ทางอะตอมในการผลิตยา Ibuprofen ซึ่งเป็นยาบรรเทาอาการปวด สังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดยบริษัท Boots ในช่วงกลางทศวรรษ 1960 ดังแผนภาพที่ 1 ถึงแม้ว่าขั้นตอนการสังเคราะห์เป็นปฏิกิริยาทางเคมีอินทรีย์ที่ดี แต่ก็มีการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตอย่างสิ้นเปลืองมีผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเป็นจำนวนมาก



แผนภาพที่ 1 การผลิต Ibuprofen โดยบริษัท Boots ช่วงกลางทศวรรษ 1960

จนกระทั่งยา Ibuprofen หมดยาของการจดสิทธิบัตรจึงเกิดการแข่งขันในการพัฒนาระบวนการผลิตมากขึ้น ในปัจจุบันบริษัท BHC ทำการผลิตยา Ibuprofen ที่ผ่านเพียงแค่ 3 ขั้นตอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตามหลักการเคมีสีเขียวดังแผนภาพที่ 2



แผนภาพที่ 2 การผลิต Ibuprofen โดยบริษัท BHC ช่วงกลางทศวรรษ 1980



ลองคิดดู

1. เปรียบเทียบมวลโมเลกุลของ Ibuprofen และมวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ของเสีย) ที่เกิดขึ้นทั้ง 2 กระบวนการผลิต
2. คำนวณร้อยละของค่าเศรษฐศาสตร์ทางอะตอมในการผลิต Ibuprofen ทั้ง 2 กระบวนการผลิต
3. ปัจจุบันยา Ibuprofen ผลิตขึ้นทั่วโลกประมาณ 14 ล้านกิโลกรัมในแต่ละปี จงหาปริมาณของเสียจากทั้ง 2 กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละปี และปริมาณของเสียลดลงเท่าใดเมื่อใช้วิธีการผลิตตามหลักเคมีเขียว



เอกสารอ้างอิง

Mike Lancaster, "Green Chemistry An introductory Text", The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2002.

Paul T. Anastas and John C. Warner, "Green Chemistry", Oxford University Press, New York, 1998.

Mary A. Ryan and Michael Tinnesand, "Introduction to Green Chemistry" American Chemical Society, 2002.

Michael C. Cann and Marc E. Connelly, "Real-World Cases in Green Chemistry" American Chemical Society, 2000.

พิมล เรืองวัฒนา, "การพัฒนาประเทศแบบยั่งยืนโดยใช้เคมีสีเขียวและเทคโนโลยีสะอาด", เคมีน่ารู้, กรกฎาคม กันยายน 2546, 30.

ACS Green Chemistry,

<http://www.chemistry.org/portal/a/c/s/1/acsdplay.html?DOC=education\greenchem\index.html>

ACS Green Chemistry Videotape,

"Innovations for a Cleaner World"



ขอขอบคุณที่ปรึกษา

1. รองศาสตราจารย์ ดร. พิมล เรืองวัฒนา
2. รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภวรรณ ตันตยานนท์
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นัยนา ขวนเกริกกุล
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรินทร์ ขวศิริ
5. อาจารย์ หม่อมหลวง ศิริพัศตร์ ไชยันต์
6. อาจารย์ ดร. วัลภา เอื้องไมตรีภรณ์
7. คุณมนธิดา สิตะธนี



สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

และ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลักเคมีสีเขียว 12 ประการ

1. การป้องกัน
(Prevention)
2. การใช้อะตอมอย่างมีคุณค่า
(Atom Economy)
3. เลือกการสังเคราะห์แบบที่เป็นอันตรายน้อย
(Less Hazardous Synthesis)
4. ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัย
(Designing Safer Chemical)
5. ใช้สารเคมีอย่างประหยัด
(Safer Solvents and Auxiliaries)
6. ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
(Design for Energy Efficiency)
7. เลือกใช้วัตถุดิบที่หมุนเวียนได้
(Use of Renewable Feedstocks)
8. ลดการใช้อนุพันธ์
(Reduce Derivatives)
9. การเร่งปฏิกิริยา
(Catalysis)
10. ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้
(Design for Degradation)
11. ตรวจสอบกระบวนการผลิตเพื่อป้องกันมลพิษ
(Real-time Analysis for Pollution Prevention)
12. ป้องกันอุบัติเหตุโดยเลือกใช้สารเคมีที่ปลอดภัย
(Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention)



จัดทำและเผยแพร่โดย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพมหานคร 10330

โทรศัพท์ 0-2218-7622

ร่วมกับ

โครงการสร้างความเข้าใจวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแก่สาธารณชน

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย

เลขที่ 111 ถนนพหลโยธิน

คลองหนึ่ง คลองหลวง

ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์ 0-2564-7000 ต่อ 1401, 1402, 1403 โทรสาร 0-2564-7060