



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ปฏิบัติการดีลส์ฮอลล์เตอร์และปฏิบัติการการเกิดเอสเทอร์
โดยใช้ไมโครเวฟ

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรชัย พุทธวงศ์

มิถุนายน 2548

สัญญาเลขที่ MRG4780111

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ปฏิบัติการดีสคอล์เดอร์และปฏิบัติการการเกิดเอสเทอร์โดยใช้ไมโครเวฟ

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรชัย พุทธวงศ์

สังกัด

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

สัญญาเลขที่ MRG4780111

ชื่อโครงการ	ปฏิกิริยาดิเล็กทริกและปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์โดยใช้ไมโครเวฟ
ระยะเวลาโครงการ	1 ปี (1 กรกฎาคม 2547 ถึง 30 มิถุนายน 2548)
ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน	ผศ. ดร. วีรชัย พุทธวงศ์
ชื่อนักวิจัยที่ปรึกษา	รศ.ดร. ดั่ง พุฒศรี
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่	1 กรกฎาคม 2547 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2548 (รวม 12 เดือน)

1. การดำเนินการ ⊗ ได้ดำเนินงานตามแผนที่วางไว้
 ○ ได้ดำเนินงานล่าช้ากว่าแผนที่วางไว้
 ○ ได้เปลี่ยนแผนที่วางไว้ดังนี้

2. รายละเอียดผลการดำเนินงานของโครงการ

ได้สร้างเครื่อง Microwave reactor ที่ใช้เครื่องไมโครเวฟธรรมดาในครัวเรือน มาดัดแปลง โดยได้พัฒนาให้สามารถ Reflux ปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจนได้ และสามารถตรวจสอบ อุณหภูมิโดยใช้ Infrared thermometer นอกจากนี้ ได้พัฒนา Soft wear ควบคุมเครื่อง Microwave Reactor นี้ โดยใช้โปรแกรมภาษา Visual Basic ซึ่งเขียนโปรแกรมควบคุมผ่าน Micro Controller และได้ทดสอบการรั่วซึมของคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้เครื่อง Microwave leakage detector (MD-2000 Digital readout) พบว่า ไม่มีการรั่วซึม (สัญญาณน้อยกว่า 5.0 mW/cm^2) และสภาพของเครื่องพร้อมสำหรับการทำปฏิกิริยา เครื่อง Microwave Reactor เครื่องนี้ได้รับการ สนับสนุนจากทุน สกว. และได้นำเข้าโครงการของ University Business Incubator ของ มหาวิทยาลัยที่ร่วมกับ สกอ. ใช้ชื่อเครื่องมือว่า OCRMJ Domestic Microwave Reactor ® รายละเอียดสามารถดูเพิ่มเติมได้ที่เวปเพจ (รายละเอียดการทดลอง ดูในรายงานฉบับสมบูรณ์)

http://www.science.mju.ac.th/chemistry/research/weerachai/reactor_eng.htm

http://www.mjubi.mju.ac.th/news_upload/1572005_2/OCRMJ-AIJ.htm

ได้ทำการสังเคราะห์สารโดยใช้ เครื่อง OCRMJ Domestic Microwave Reactor ® ซึ่งทำการทดลองเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ โดยทำการทดลองในลักษณะของ Microwave-assisted facile synthesis ของสารแต่ละตัวดังนี้คือ ethyl-p-nitrobenzoate, phenacetin, 9,10-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylic acid, 9,10-dihydroanthracene-9,10-endo α, β succinic anhydride, methyl-11-(carbomethoxymethyl)-9,11-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylate, 9,10-dihydroanthracene-9,10-endo- α, β

naphthroquinone, 9,10-dihydroanthracene-9,10-endo- α , β -benzoquinone และ zinc monoglycerolate พบว่าใช้เวลาในการทดลองที่เร็ว เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูง กว่าวิธีปกติอย่างมาก (รายละเอียดการทดลอง ดูในรายงานฉบับสมบูรณ์)

ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์ผลงานบางส่วน ในวารสาร International Journal ชื่อ Molecules ซึ่งมี Impact factor 0.99 ใช้ชื่อเรื่องว่า Facile Microwave-assisted Synthesis of 9,10-Dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylic acid Methyl Ester

ได้ส่งต้นฉบับไปตีพิมพ์ในวารสาร Synthetic Communication ซึ่งมี Impact factor 1.45 และอยู่ในระหว่างการพิจารณา ใช้ชื่อเรื่องว่า Microwave-assisted facile synthesis and crystal structure of cis-9,10-dihydroanthracene-9,10-endo α , β succinic anhydride

มีข้อเสนอแนะเรื่องเวลาการทำงานวิจัย ที่ผู้ขอทุนได้ทุน 1 ปี เป็นการประเมินที่ผิดพลาดของนักวิจัย ซึ่งเวลาควรจะมากกว่า 1 ปี เพื่อให้งานออกมาสมบูรณ์มากกว่านี้ ซึ่งจะได้ดำเนินการทดลองต่อ หากได้รับการสนับสนุนในระยะต่อไป

English**Abstract**

Microwave-assisted organic synthesis is widely used as many organic reactions can be conducted rapidly under microwave irradiation. Domestic microwave ovens are of considerable interest as thus to be reported as accelerated organic reactions under microwave heating. In this report, the domestic microwave oven has been modified together the Esterification, and Diels-Alder reactions under microwave irradiation were observed. The microwave-assisted synthesis of ethyl-p-nitrobenzoate, phenacetin, the anthracene adducts; 9,10-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylic acid, 9,10-dihydroanthracene-9,10-endo- α,β -succinic anhydride, methyl-11-(carbomethoxy methyl)-9,11-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylate, 9,10-dihydroanthracene - 9,10-endo- α,β -naphthroquinone, 9,10-dihydroanthracene-9,10-endo- α,β -benzoquinone as well as zinc monoglycerolate were achieved in short reaction times and cleaner reactions than for the previously-described synthetic processes. In some cases eco-friendly solventless methodology has been used.

ไทย

บทคัดย่อ

การนำรังสีไมโครเวฟมาช่วยในการสังเคราะห์ในทางอินทรีย์เคมีได้มีการทำกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว รายงานที่เกี่ยวกับการนำเตาไมโครเวฟที่ใช้ในบ้านมาใช้ในการสังเคราะห์โดยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นได้รับความสนใจอย่างมาก ในรายงานฉบับนี้ได้นำเตาไมโครเวฟที่ใช้ในบ้านมาประยุกต์และใช้ในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาดีล-อัลเดอร์ โดยได้ทำการสังเคราะห์ เอทิล-พารา-ไนโตร เบนโซเอต (ethyl-p-nitrobenzoate) ฟีนาซีติน (phenacetin) 9,10-ไดไฮโดร- 9,10-เอทานแอนทราซีน-11-คาร์บอกซิลิก แอซิด (9,10-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylic acid) 9,10-ไดไฮโดรแอนทราซีน-9,10-เอ็นโด-แอลฟา-ปีต้า-ซักซินิค แอนไฮไดร (9,10-dihydroanthracene-9,10-endo- α,β -succinic anhydride) เมทิล-11-คาร์โบเมทอกซีเมทิล-9,10-ไดไฮโดร- 9,10-เอทานแอนทราซีน-11-คาร์บอกซิเลต (methyl-11-(carbomethoxy methyl)-9,11-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylate) 9,10-ไดไฮโดรแอนทราซีน-9,10-เอ็นโด-แอลฟา-ปีต้า-แนฟโทควิโนน (9,10-dihydroanthracene-9,10-endo- α,β -naphthroquinone) 9,10-ไดไฮโดรแอนทราซีน-9,10-เอ็นโด-แอลฟา-ปีต้า-เบนโซควิโนน (9,10-dihydroanthracene-9,10-endo- α,β -benzoquinone) และ ซิงค์ โมโนกลีเซอโรเลต (zinc monoglycerolate) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็ว สะอาดและในบางปฏิกิริยาใช้ตัวทำละลายน้อยซึ่งเป็นการช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)	i
บทคัดย่อ	ii
English	iii
ภาษาไทย	iii
บทที่ 1	
1 บทนำ	1
1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave)	3
1.1.1 สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	4
1.2 คลื่นไมโครเวฟ (microwave)	4
1.2.1 คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเด่น 3 ประการ	6
1.3 เตาอบไมโครเวฟ (microwave oven)	6
1.3.1 แมกนีตรอน	8
1.3.2 ส่วนประกอบของเตาไมโครเวฟ	9
1.3.3 ประโยชน์ของไมโครเวฟในทางเคมี	10
1.3.4 ผลของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร่างกาย	11
1.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature review)	12
บทที่ 2	
2. เนื้อหางานวิจัย	52
2.1 เครื่องทำปฏิกิริยาเคมีโดยรังสีไมโครเวฟ	52
(OCRMJ Domestic Microwave Reactor)	
2.1.1 รายการอุปกรณ์	53
2.1.2 การทำตัว Reactor	53
2.1.3 การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Visual Basic 6	54
2.2 ปฏิกิริยาที่ได้ทดลองโดยเครื่อง OCRMJ Domestic Microwave Reactor ®	66
2.2.1 การสังเคราะห์เอทิล-พารา-ไนโตรเบนโซเอต (Ethyl-p-nitrobenzoate)	66

2.2.1.1 การสังเคราะห์ เอธิล-พารา-ไนโตรเบนโซเอต (Ethyl-p-nitrobenzoate) โดยวิธีการรีฟลักซ์	66
2.2.1.2 การสังเคราะห์เอธิล-พารา-ไนโตรเบนโซเอต (Ethyl-p-nitrobenzoate) ใช้ OCRMJ Domestic Microwave Reactor ®	67
2.2.1.3 ผลการทดลองทาง Spectroscopy	68
2.2.1.4 สรุปผลการทดลอง	69
2.2.2 การสังเคราะห์ฟีนาซีติน (Phenacetin)	70
2.2.2.1 การสังเคราะห์ฟีนาซีติน (Phenacetin) โดยการรีฟลักซ์	70
2.2.2.2 การสังเคราะห์ฟีนาซีติน (Phenacetin) โดยการใช้ OCRMJ Domestic Microwave Reactor®	71
2.2.2.3 ผลการทดลองทาง Spectroscopy	72
2.2.2.4 สรุปผลการทดลอง	73
2.2.3 การสังเคราะห์ 9,10-ไดไฮโดร-9,10-อีธานแอนทราซีน-11-คาร์บอกซิลิกแอซิด (9,10-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylic acid)	74
2.2.3.1 การสังเคราะห์ 9,10-ไดไฮโดร-9,10-อีธานแอนทราซีน-11-คาร์บอกซิลิก แอซิด (9,10-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylic acid) โดยการใช้ OCRMJ Domestic Microwave Reactor®	74
2.2.3.2 การสังเคราะห์ 9,10-ไดไฮโดร-9,10-อีธานแอนทราซีน-11-คาร์บอกซิลิก แอซิด (9,10-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylic acid) โดยการใช้ Seal tube	75
2.2.3.3 การสังเคราะห์ 9,10-ไดไฮโดร-9,10-อีธานแอนทราซีน-11-คาร์บอกซิลิก แอซิด (9,10-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylic acid) โดยการใช้ Reflux ธรรมดา	75
2.2.3.4 ผลการทดลองทาง Spectroscopy	75
2.2.3.5 สรุปผลการทดลอง	78

2.2.4 การสังเคราะห์ 9,10 – ไดไฮโดรแอนทราซีน -9,10-เอนโด – แอลฟา, เบต้า-ซัก	78
ซินิค แอนไฮไดรด์ (9,10-dihydroanthracene-9,10-endo α, β succinic anhydride) โดยใช้ Anthracene และ Fumaric acid	
2.2.4.1 การสังเคราะห์ 9,10 – ไดไฮโดรแอนทราซีน -9,10-เอนโด – แอลฟา, เบต้า-ซักซินิค แอนไฮไดรด์ (9,10-dihydroanthracene-9,10-endo α, β succinic anhydride) โดยการใช้ OCRMJ Domestic Microwave Reactor®	78
2.2.4.2 การสังเคราะห์ 9,10-ไดไฮโดรแอนทราซีน -9,10-เอนโด – แอลฟา, เบต้า-ซักซินิค แอนไฮไดรด์ (9,10-dihydroanthracene-9,10-endo α, β succinic anhydride) โดยการใช้ Seal tube	79
2.2.4.3 ผลการทดลองทาง Spectroscopy	79
2.2.4.4 สรุปผลการทดลอง	82
2.2.5 การสังเคราะห์ ซีส-9,10-ไดไฮโดรแอนทราซีน-9,10-เอนโด- แอลฟา, เบต้า-ซัก	82
ซินิค แอนไฮไดรด์ (cis- 9,10-dihydroanthracene-9,10-endo α, β succinic anhydride)	
2.2.5.1 การสังเคราะห์ ซีส-9,10 – ไดไฮโดรแอนทราซีน -9,10-เอนโด – แอลฟา, เบต้า-ซักซินิค แอนไฮไดรด์ (cis-9,10-dihydroanthracene-9,10- endo α, β succinic anhydride) โดยการใช้ OCRMJ Domestic Microwave Reactor®	82
2.2.5.2 การสังเคราะห์ ซีส-9,10 – ไดไฮโดรแอนทราซีน -9,10-เอนโด – แอลฟา, เบต้า-ซักซินิค แอนไฮไดรด์ (cis-9,10-dihydroanthracene-9,10-endo α, β succinic anhydride) โดยการใช้ Seal tube	83
2.2.5.3 ผลการทดลองทาง Spectroscopy	84
2.2.5.4 สรุปผลการทดลอง	87

2.2.6 การสังเคราะห์ เมทิล -11 – คาร์โบเมทอกซีเมทิล-9,11-ไดไฮโดร-9, 10-เอทาโนแอนทราซีน-11-คาร์บอกซีเลท (Methyl-11-(carbomethoxymethyl)-9,11-dihydro-9,10-ethanoanthracene-11-carboxylate)	88
2.2.6.1 การสังเคราะห์ เมทิล-11-(คาร์โบเมทอกซีเมทิล)-9,11-ไดไฮโดร-9,10-เอทาโนแอนทราซีน-11-คาร์บอกซีเลท (Methyl-11-(carbomethoxymethyl)-9,11-dihydro-9,10-ethano anthracene-11-carboxylate) (General) โดยการใช้ Seal tube	88
2.2.6.2 การสังเคราะห์ เมทิล-11-(คาร์โบเมทอกซีเมทิล)-9,11-ไดไฮโดร-9,10-เอทาโนแอนทราซีน-11-คาร์บอกซีเลท (Methyl-11-(carbomethoxymethyl)-9,11-dihydro-9,10-ethano anthracene-11-carboxylate) (General) โดยการใช้ OCRMJ Domestic Microwave Reactor®	89
2.2.6.3 การสังเคราะห์ เมทิล-11-(คาร์โบเมทอกซีเมทิล)-9,11-ไดไฮโดร-9,10-เอทาโนแอนทราซีน-11-คาร์บอกซีเลท (Methyl-11-(carbomethoxymethyl)-9,11-dihydro-9,10-ethano anthracene-11-carboxylate) โดยการ Reflux	89
2.2.6.4 ผลการทดลองทาง Spectroscopy	90
2.2.6.5 การทดสอบสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ	91
2.2.6.5 สรุปผลการทดลอง	93
2.2.7 การสังเคราะห์อนุพันธ์ของควิโนน	93
2.2.7.1 การสังเคราะห์ 9,10-ไดไฮโดรแอนทราซีน-9,10-เอนโด-อัลฟา, เบต้า-แนปโทควิโนน(9,10-Dihydroanthracene-9,10-endo- α , β -Naphthroquinone) โดยวิธี Seal tube (รีฟลักซ์แบบใช้การควบแน่นด้วยอากาศ โดยใช้หลอด Seal tube)	94
2.2.7.2 การสังเคราะห์ 9,10-ไดไฮโดรแอนทราซีน-9,10-เอนโด-อัลฟา, เบต้า-เบนโซควิโนน(9,10-Dihydroanthracene-9,10-endo- α , β -Benzoquinone) โดยวิธี Seal tube (รีฟลักซ์แบบใช้การควบแน่นด้วยอากาศ โดยใช้หลอด Seal tube)	94

2.2.7.3	การทำให้สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์บริสุทธิ์	96
2.2.7.4	ผลการสังเคราะห์อนุพันธ์ของควิโนน โดยวิธี Seal tube	96
2.2.7.5	ข้อมูลทางสเปกโทรสโคปีของ 9,10-ไดไฮโดรแอนทราซีน-9,10-เอน โด-อัลฟา,เบต้า- แนปโทควิโนน โดยวิธี Seal tube	98
2.2.7.6	ข้อมูลทางสเปกโทรสโคปีของ 9,10-ไดไฮโดรแอนทราซีน-9,10-เอน โด-อัลฟา,เบต้า-เบนโซควิโนน โดยวิธี Seal tube	103
2.2.7.7	สรุปผลการทดลอง	105
2.2.8	ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation)	106
2.2.8.1	การสังเคราะห์ ซิงค์ โมโนกลีเซอโรเลท (zinc monoglycerolate or ZMG)	106
2.2.8.2	การสังเคราะห์ซิงค์ โมโนกลีเซอโรเลท (zinc monoglycerolate) โดยการ รีฟลักซ์	106
2.2.8.3	การสังเคราะห์ ซิงค์ โมโนกลีเซอโรเลท (zinc monoglycerolate) โดยใช้ OCRMJ Domestic Microwave Reactor®	107
2.2.8.4	ผลการทดลองทาง Spectroscopy ของ ซิงค์ โมโนกลีเซอโรเลท (zinc monoglycerolate or ZMG)	109
2.2.8.4	สรุปผลการทดลอง	112
2.3	ข้อเสนอแนะ	112
2.4	เอกสารอ้างอิง	113
2.5	Out Put	114

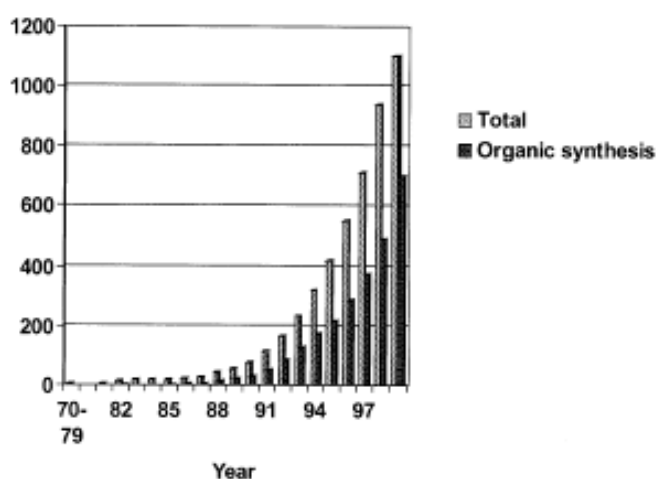
ภาคผนวก

- Reprint (Molecules International Journal)
- Manuscript (Synthetic Communication)

บทที่ 1

บทนำ

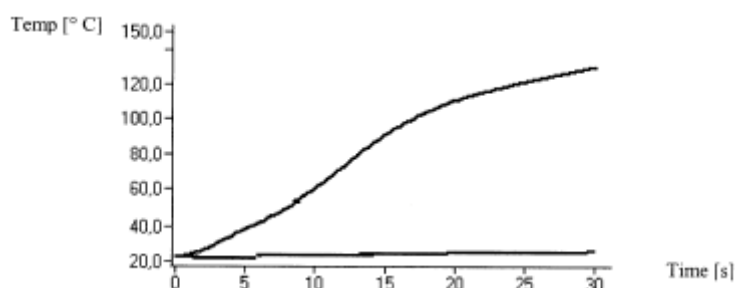
การพัฒนาการใช้ไมโครเวฟ เพื่อทำให้อาหารร้อนมีมานานแล้วกว่า 50 ปี¹ ในปี 1970 ได้มีการพัฒนาสร้าง Microwave Generator แบบง่าย เป็น Magnetron เป็นครั้งแรก ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการทำเตาอบไมโครเวฟแบบที่ใช้ในครัวเรือน และแทบจะเป็นอุปกรณ์จำเป็นในทุกห้องครัว และในปีเดียวกันนี้เอง (1970)² เทคโนโลยีของไมโครเวฟ ได้เริ่มนำมาใช้ในสาขาเคมี โดยเริ่มจากอนินทรีย์เคมีก่อน และเริ่มมีการพัฒนามาใช้กับเคมีอินทรีย์ ประมาณกลางปี 1980 และเริ่มมี international publications ออกมาเรื่อยๆ ในปี 1986 เป็นต้นมา ผลงานของ Gedye³ ได้เริ่มรายงานการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีอินทรีย์ 4 ชนิด คือ Hydrolysis, Oxidation, Esterification และปฏิกิริยาการแทนที่ โดยทำปฏิกิริยาในเตาอบไมโครเวฟ เปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาดังเดิม (เช่น การ Reflux) พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเตาอบไมโครเวฟ จะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า แต่ให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงกว่าการทำปฏิกิริยาดังเดิม โดยทั่วไปแล้วอัตราการเกิดปฏิกิริยาในเตาอบไมโครเวฟจะสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบดั้งเดิม 5 - 240 เท่า ขึ้นกับชนิดของปฏิกิริยา เคมีอินทรีย์สังเคราะห์ที่ใช้ไมโครเวฟเข้าช่วย มี Publication ออกมาปรากฏเรื่อยๆจนประมาณกลางปี 1990 ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 1.1)⁴ สาเหตุหลักที่เกิดการเติบโตของงานวิจัยด้านนี้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมี Commercial microwave reactor ที่ใช้สำหรับเคมีอินทรีย์สังเคราะห์ ออกจำหน่ายได้ง่ายขึ้น ประกอบกับ การค้นพบเทคนิคการทำปฏิกิริยาแบบปราศจากตัวทำละลาย (Solvent free technique) โดยใช้ไมโครเวฟ ทำให้มีความปลอดภัยสูงขึ้น และเหนือสิ่งอื่นใดก็คือ เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยานั้น น้อยมาก



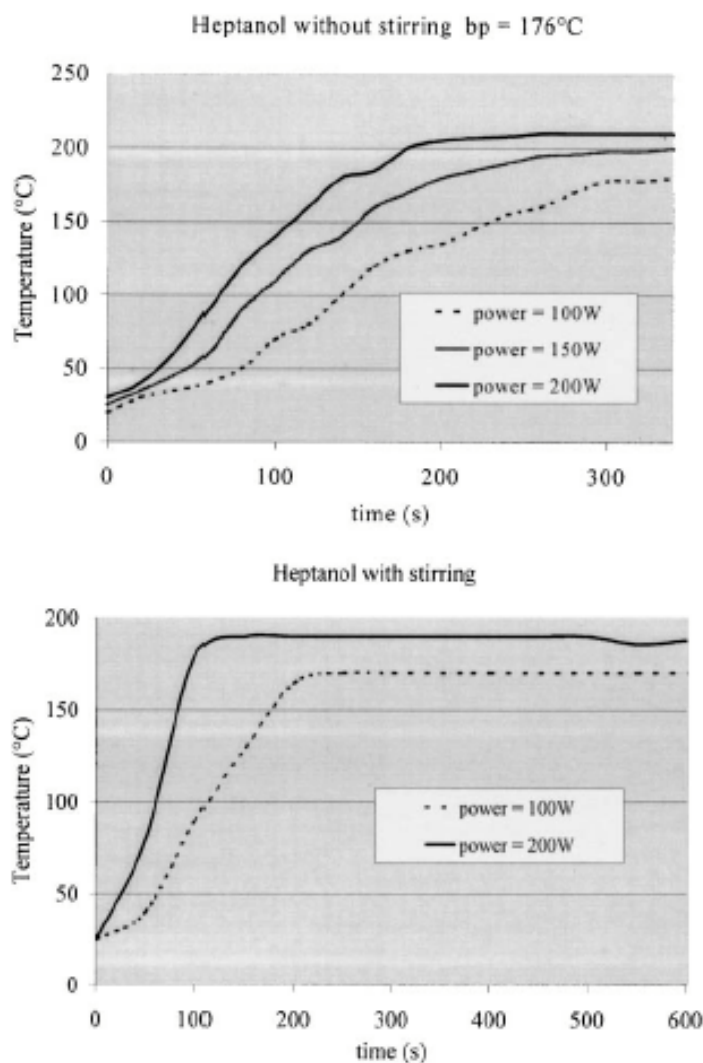
รูปที่ 1.1 The accumulated number of published articles involving organic and inorganic microwave assisted synthesis 1970-1999⁴

แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ Publications จาก **รูปที่ 1.1** หากดูจำนวนเทียบกับสัดส่วนของ ปฏิบัติการทั้งหมดของอินทรีย์เคมี ก็ยังถือว่าน้อยอยู่ ในปัจจุบันจึงยังมีการศึกษาด้านนี้อย่างต่อเนื่องต่อไป

ปฏิบัติการทางเคมีอินทรีย์ส่วนใหญ่จะใช้ความร้อน โดยเครื่องมือพื้นฐานเช่น ใช้ Oil bath, Sand bath, Heating jacket เป็นต้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะช้าและใช้เวลานาน และการเกิด over heat เป็นเวลานาน ก็ส่งผลต่อตัวอุปกรณ์ พลาสติกไฟเบอร์ ที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องกำเนิดความร้อนเหล่านี้เสียหายได้ง่าย ทำให้อายุการใช้งานสั้น ในทางตรงกันข้าม การใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟ เป็นการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟผ่านภาชนะลงในสารตัวทำปฏิกิริยาและเกิดความร้อนระหว่างสารตัวทำปฏิกิริยา หรือตัวทำละลายเท่านั้น ให้ความร้อนที่สูงกว่าและใช้เวลาสั้นกว่า (เช่น **รูปที่ 1.2 และ 1.3**)⁴



รูปที่ 1.2 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเวลาของน้ำและ Dioxane (150 W Microwave Irradiation) เส้นบนคือน้ำ เส้นล่าง คือ Dioxane



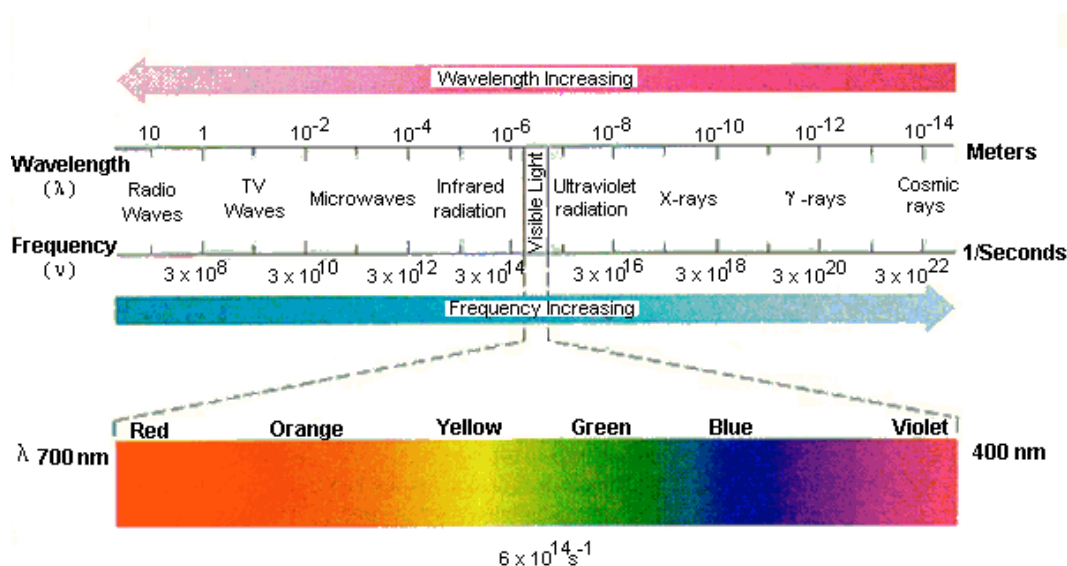
รูปที่ 1.3 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเวลาของ Heptanol ที่ Microwave Irradiation ต่างๆ

1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ^(5,6,7)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ ไฮน์ริช เฮิร์ต เมื่อ พ.ศ. 2431 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นก็คือการสั่นสะเทือนของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ซึ่งเคลื่อนที่จากขั้วลบไปขั้วบวกเสมอ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่อเนื่องกันเป็นช่วงกว้าง เรียกช่วงความถี่เหล่านี้ว่า “สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า” ดังรูปที่ 1.4 และมีชื่อเรียกช่วงความถี่ต่างกันตามแหล่งกำเนิดและวิธีการตรวจวัดคลื่น

1.1.1 สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า⁽⁸⁾

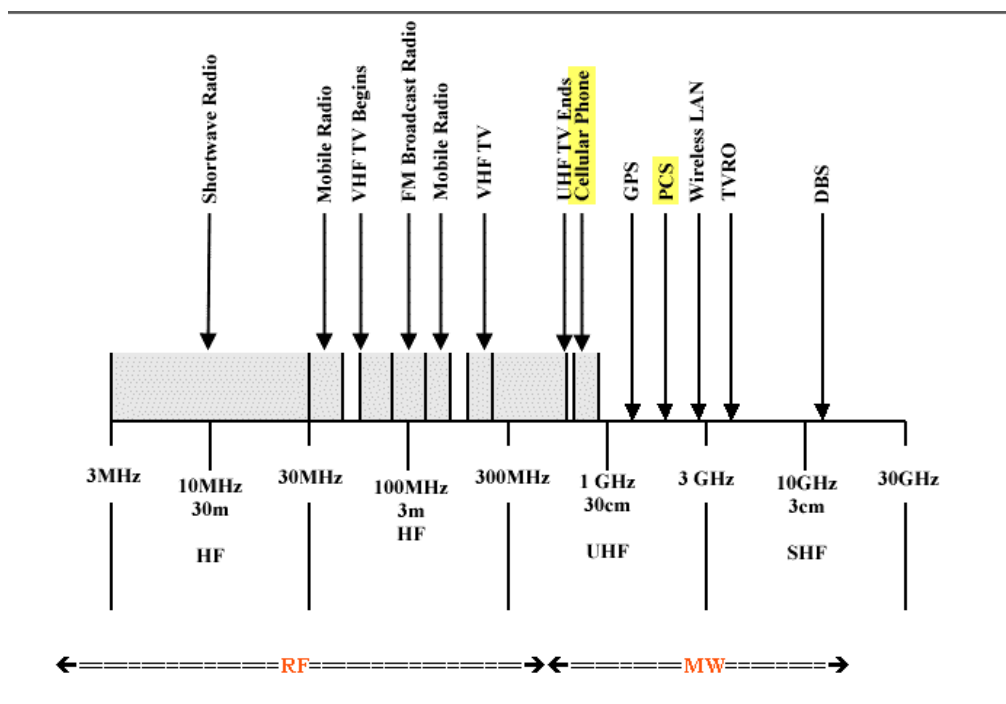
1. ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่
2. อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดในสุญญากาศเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที
3. เป็นคลื่นตามขวาง
4. ถ่ายเทพลังงานจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง
5. ถูกปล่อยออกมาและถูกดูดกลืนได้โดยสสาร
6. คลื่นสามารถแทรกสอด สะท้อน หักเห และเลี้ยวเบนได้



รูป 1.4 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Regions of the electromagnetic spectrum)⁽⁹⁾

1.2 คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)^(5,8,10)

คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมาก มีลักษณะคล้ายคลื่นวิทยุแต่มีความถี่สั้นกว่าซึ่งอยู่ระหว่างช่วงของรังสีอินฟราเรด (Infrared ray) และคลื่นวิทยุ (Radiowave) ดังรูปที่ 1.4 ,1.5 ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร [ความถี่ ระหว่าง 0.3 ถึง 300 จิกะเฮิรตซ์ (จิกะเฮิรตซ์ = 10⁹ รอบต่อวินาที)] คลื่นไมโครเวฟจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับคลื่นวิทยุ ถูกนำไปใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคมด้านต่างๆ เนื่องจากไมโครเวฟจะสะท้อนกับผิวโลหะได้ดี จึงนำไปใช้ประโยชน์ในการตรวจหาตำแหน่งของอากาศยานเรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า เรดาร์ โดยส่งสัญญาณไมโครเวฟออกไปกระทบอากาศยาน และ รับคลื่นที่สะท้อนกลับจากอากาศยานทำให้ทราบระยะห่างระหว่างอากาศยานกับแหล่งส่งสัญญาณไมโครเวฟได้ คลื่นวิทยุความถี่ต่าง ๆ มีการนำมาใช้ประโยชน์หลายด้านด้วยกัน ดังแสดงใน ตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.5 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นวิทยุ และไมโครเวฟ ⁽¹¹⁾

ตารางที่ 1.1 คลื่นวิทยุความถี่ต่าง ๆ และการใช้งาน ⁽¹²⁾

ความถี่ (ซีอ)	ความยาวคลื่น	การใช้งาน
ต่ำกว่า 30 kHz (VLF)	มากกว่า 10 km	ใช้สื่อสารทางทะเล
30 – 300 kHz (LF)	1 – 10 km	ใช้สื่อสารทางทะเล
0.3 – 3 MHz (MF)	0.1 – 1 km	ใช้ส่งคลื่นวิทยุระบบเอเอ็ม
3 – 30 MHz (HF)	10 – 100 m	ใช้ส่งวิทยุคลื่นสั้นสื่อสารระหว่างประเทศ
30 – 300 MHz (VHF)	1 – 10 m	ใช้ส่งคลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็มและคลื่นโทรทัศน์
0.3 – 3 GHz (UHF)	10 – 100 cm	ใช้ส่งคลื่นโทรทัศน์และไมโครเวฟ
3 – 30 GHz (SHF)	1 – 10 cm	ใช้ส่งไมโครเวฟและเรดาร์
30 – 300 GHz (EHF)	1 – 10 mm	ใช้ส่งไมโครเวฟ

1.2.1 คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเด่น 3 ประการ (รูปที่ 1.6)

1. การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟ สามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระดาษ ไม้ และพลาสติกได้ เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ สำหรับภาชนะที่จะใช้ในการ ประกอบอาหาร อาจจะเป็นกระเบื้อง ภาชนะแก้วทนความร้อน ภาชนะพลาสติกที่เป็น โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ที่ทนความร้อนได้มากกว่า 120 องศาเซลเซียส

2. การดูดซึม (Absorption) ปกติอาหารทั่วไปจะประกอบด้วยน้ำ โมเลกุลของน้ำในอาหาร จะดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ ทำให้อาหารร้อนอย่างรวดเร็ว และอีกนัยหนึ่งเมื่อโมเลกุลของน้ำดูดซึม คลื่นไมโครเวฟแล้วจะร้อนจนเดือด

3. การสะท้อนกลับ (Reflection) คลื่นไมโครเวฟเมื่อกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุภาชนะดังกล่าวได้จะสะท้อนกลับหมด ดังนั้นอาหารที่ใส่ภาชนะดังกล่าวก็จะไม่สุก



การส่งผ่าน (Transmission)
(Reflection)



การดูดซึม (Absorption)

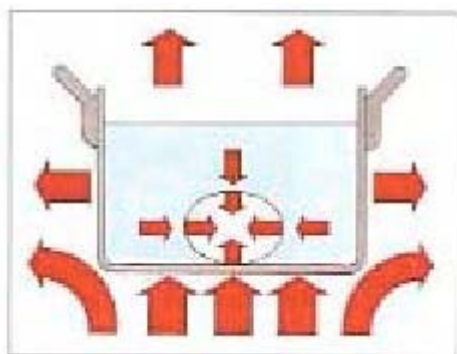


การสะท้อนกลับ

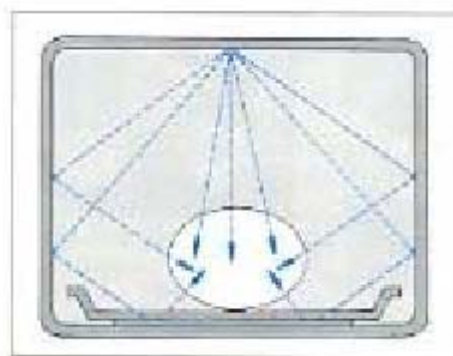
รูปที่ 1.6 ลักษณะเด่นของคลื่นไมโครเวฟ

1.3 เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven) ^(13,14)

เตาอบไมโครเวฟเป็นวิวัฒนาการในการปรุงอาหารลำดับที่สองรองลงมาจากการใช้ไฟซึ่ง การประกอบอาหารด้วยเตาอบไมโครเวฟนี้แตกต่างจากการประกอบอาหารด้วยเตาธรรมดา คือ เตาอบธรรมดาให้พลังงานความร้อนโดยเปลวไฟแบบเตาอบแก๊ส หรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อาหารสุกโดยการถ่ายเทความร้อน คือการนำ การพา และการแผ่รังสี แต่เตาไมโครเวฟ ทำให้อาหารสุกโดยคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูง จึงทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว และเร็วกว่าการ ประกอบอาหารด้วยระบบอื่นๆโดยไม่เสียพลังงานความร้อน ดังรูปที่ 1.7



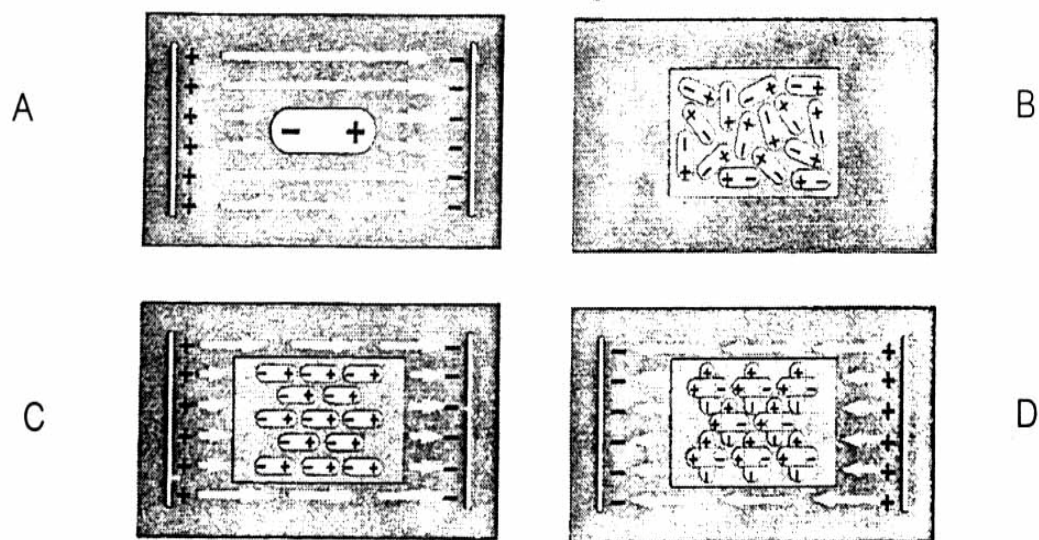
การให้ความร้อนแบบธรรมชาติ



การให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ

รูปที่ 1.7 หลักการให้ความร้อน

หัวใจสำคัญของเตาไมโครเวฟ คือตัวแมกนีตรอน ที่จะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ ระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟ คือคลื่นไมโครเวฟจะสั่นสะเทือนถึง 2,450 ล้านครั้ง ต่อวินาที หรือเรียกความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ พุ่งเข้าสู่อาหารจากทุกทิศทุกทางโดยรอบของผนังเตา ด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่อาหาร เมื่อคลื่นไปกระทบอาหารโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในอาหารซึ่งมีประจุ ไฟฟ้าบวกที่ปลายด้านหนึ่ง และประจุลบที่ปลายอีกด้านหนึ่ง คลื่นไมโครเวฟบวกลบที่สั่นสะเทือนอยู่จะปะทะกับโมเลกุลบวก-ลบที่สั่นของน้ำ ดึงดูดโมเลกุลของน้ำเข้าใกล้แล้วผลักออกและทำให้หมุนกลับไปมาถึง 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที และชนโมเลกุลอื่นๆต่อไปจนเกิดเป็นพลังงานจลน์ และ พลังงานจลน์นี้เองก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 1.8



A : โมเลกุลอยู่แบบอิสระ

B : เมื่อมีสนามไฟฟ้า

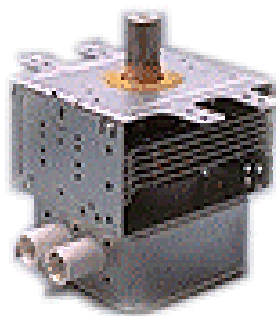
C : ประจุไฟฟ้าบนโมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าตรงข้าม

D : โมเลกุลเคลื่อนที่สวนทางกันมีการเสียดสีทำให้เกิดความร้อนขึ้น

รูปที่ 1.8 Basic principle of microwave oven.

1.3.1 แมกนีตรอน⁽¹⁵⁾

ในปี ค.ศ. 1940 แรลดาล์และบุท นักวิทยาศาสตร์ของมหาวิทยาลัยเบอร์มิงแฮม ได้ร่วมมือกันประดิษฐ์เครื่องมือเรียก “แมกนีตรอน” ดังรูปที่ 1.9 เพื่อประโยชน์ทางการทหาร แมกนีตรอนเป็นส่วนสำคัญในการตรวจจับเครื่องบินนาซี โดยมันทำหน้าที่ผลิตคลื่นไมโครเวฟออกไปในท้องฟ้าเมื่อกระสวยยานเข้าศึกคลื่นจะสะท้อนกลับปรากฏให้เห็นบนจอเรดาร์ หลังสงครามโลกครั้งที่สอง ดร. เพอร์ซี สเปนเซอร์ พบหนทางนำ แมกนีตรอนมาใช้ทำเตาอบแบบใหม่ที่ไม่ต้องใช้ความร้อนจากไฟโดยให้ชื่อเตาชนิดใหม่ว่า “เรดาร์เรนจ์” (Radar range)

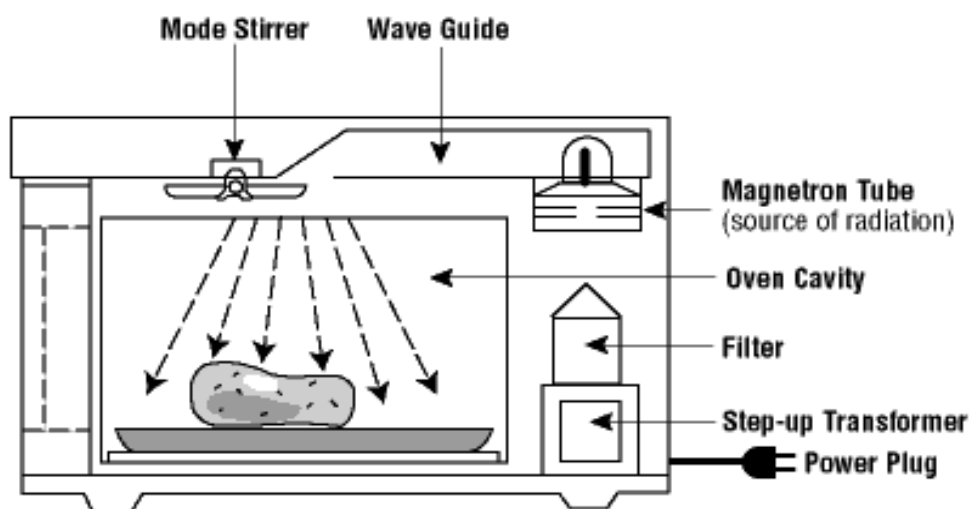


รูปที่ 1.9 ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Typical magnetron) ⁽¹⁵⁾

1.3.2 ส่วนประกอบของเตาไมโครเวฟ ⁽¹⁶⁾

ส่วนประกอบของเตาไมโครเวฟ ดังรูปที่ 1.10 ได้แก่ หลอดแมกนีตรอน (Magnetron tube or source of radiation) พัดลมกระจายคลื่นไมโครเวฟ (Mode stirrer) ผนังประตูช่วยเก็บคลื่นไมโครเวฟ (Oven cavity) หม้อแปลงไฟ (Step-up transformer)

หลอดแมกนีตรอนซึ่งเป็นตัวที่ให้กำเนิดคลื่นไมโครเวฟจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทำให้เกิดชั่วไฟฟ้าบวกและลบซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ตรงกันข้ามที่มีความถี่ในการเปลี่ยนชั่วไฟฟ้าสูงมากซึ่งประจุไฟฟ้าบนโมเลกุลสารจะเคลื่อนที่เข้าหาชั่วไฟฟ้าที่ตรงกันข้ามสลับไปสลับมาอย่างรวดเร็วโมเลกุลที่เคลื่อนที่สวนทางกันจะเกิดการปะทะกันและชนกันทำให้มีการเสียดสีและความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 1.10 เตาอบไมโครเวฟสมัยใหม่ ⁽¹⁶⁾

1.3.3 ประโยชน์ของไมโครเวฟในทางเคมี ⁽¹⁴⁾

- ใช้ในการอบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
- ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ Thermoreactor ทั่วๆไปวิธีการนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณของ ไครเมียม เหล็ก ทองแดง นิเกิล ฟอสฟอรัส เงิน ไนโตรเจน และสังกะสี ภายใน 2 นาที แทนที่จะต้องใช้เวลา มากกว่า 2 ชั่วโมง โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสียที่มีสารประกอบอินทรีย์สูงๆ การใช้ไมโครเวฟจึงมีความสะดวก และมีประสิทธิภาพสูงกว่าเทคนิคอื่นๆที่มีการนำมาใช้ในการย่อยสลายตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์
- ใช้ในการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นวิธีใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเป็นลำดับเนื่องจากให้ความร้อนอย่างรวดเร็วและประหยัดพลังงานได้มาก จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านเตาไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในเตาอบไมโครเวฟจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าแต่ให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงกว่าการทำปฏิกิริยาดังเดิม เช่นการรีฟลักซ์ (Reflux) ซึ่งจะช่วยให้อัตราการสังเคราะห์สารมีประสิทธิภาพมากขึ้น เป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตและเพิ่มมูลค่าในการผลิต เชิงพาณิชย์

1.3.4 ผลของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร่างกาย ^(14,15,16)

ปัจจุบันประเทศทั่วโลกใช้คลื่นวิทยุ และไมโครเวฟในการติดต่อสื่อสารกันอย่างแพร่หลาย และไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมทั้งเตาไมโครเวฟที่ใช้ในบ้านเรือน อุปกรณ์เหล่านี้ผลิตและส่งกระจายคลื่นวิทยุ และไมโครเวฟออกสู่บรรยากาศตลอดเวลาโดยที่ประสาทสัมผัสของมนุษย์ ไม่สามารถรับรู้ได้

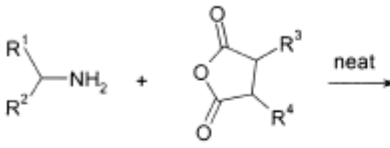
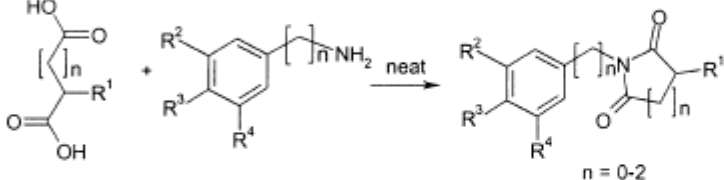
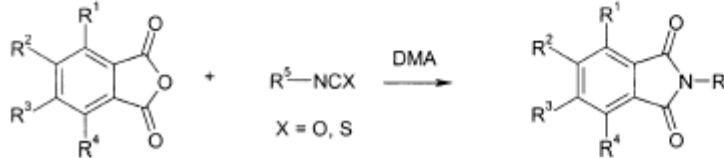
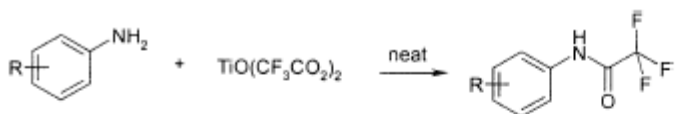
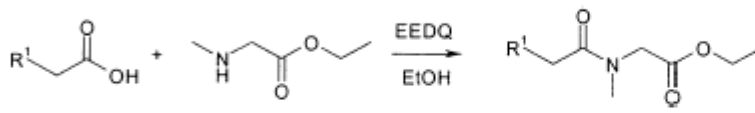
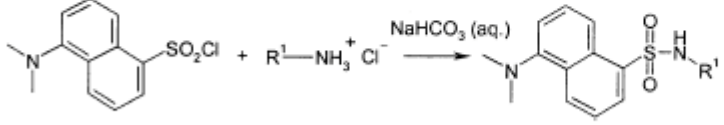
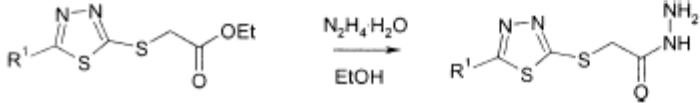
คลื่นไมโครเวฟเริ่มมีผลต่อร่างกายที่ระดับความเข้มตั้งแต่ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ขึ้นไป จึงมีการกำหนดระดับความเข้มปลอดภัยไว้ที่ 10 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ต่ำกว่าระดับอันตราย 10 เท่า ซึ่งอันตรายดังกล่าวเน้นว่าจะเกิดขึ้นกับบุคคลที่ทำงานใกล้ชิดหรือได้สัมผัสกับคลื่นที่มี ความเข้มสูงและต่อเนื่องเป็นเวลานานเท่านั้น อวัยวะที่มีความไวได้แก่นัยน์ตา ปอด ไขว้ น้ำดี กระเพาะปัสสาวะ อัณฑะ และบางส่วนของระบบทางเดินอาหาร โดยเฉพาะนัยน์ตา และอัณฑะ เป็นอวัยวะที่อ่อนแอที่สุด

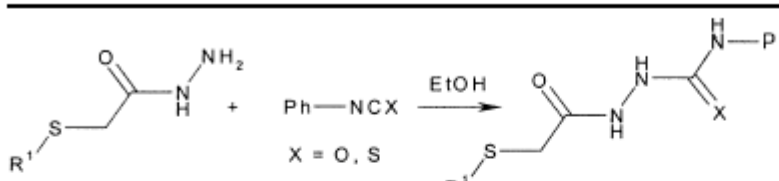
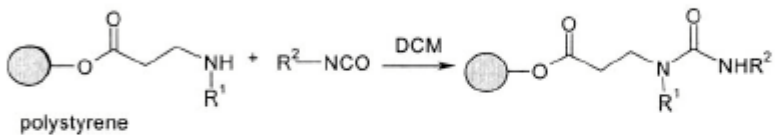
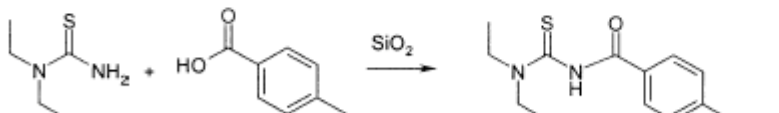
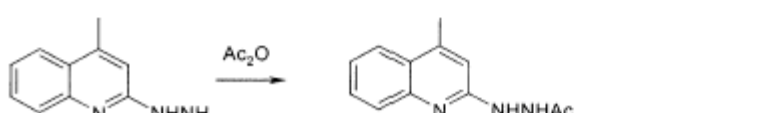
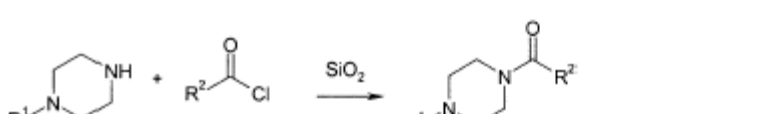
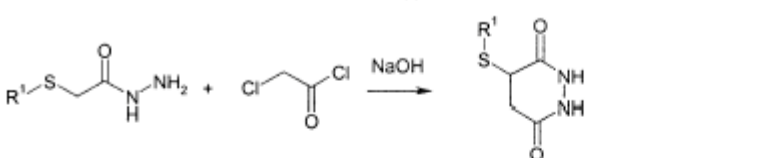
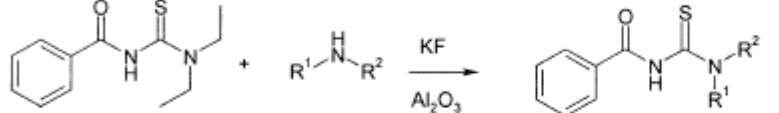
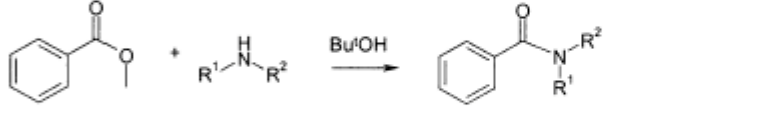
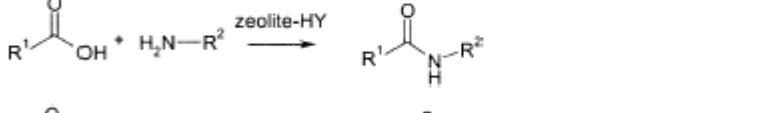
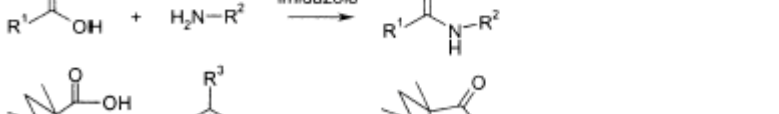
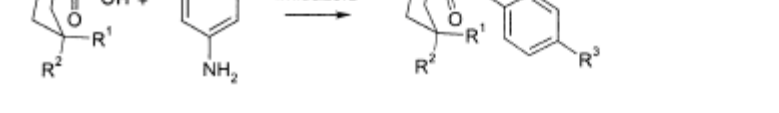
1.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

ผลงานส่วนใหญ่ จะเป็นเทคนิค Solvent free และส่วนใหญ่ เป็นผลงานที่ใช้พลังงานไม่เกิน 70% ของเครื่อง Microwave reactor และใช้เวลาอยู่ในช่วงไม่เกิน 5 นาที

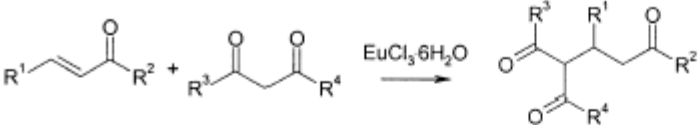
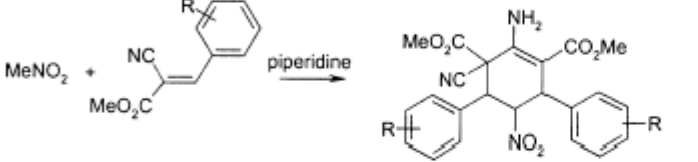
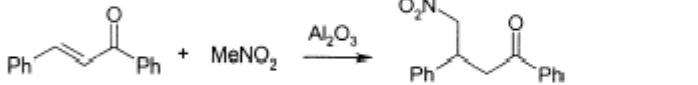
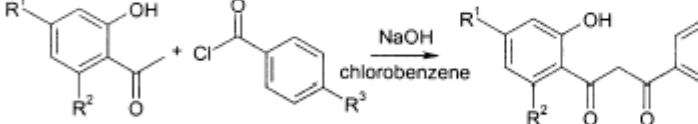
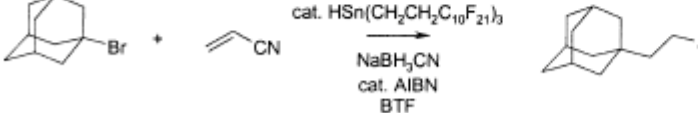
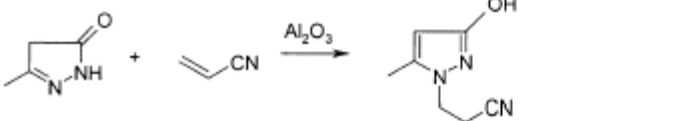
ตัวอย่างปฏิกิริยาที่ใช้ Microwave ช่วย และ เปอร์เซ็นต์ของผลผลิต จะแสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้ (จาก a review paper ของ Lidstrom, P. *et. al.*¹⁷)

N-Acylation

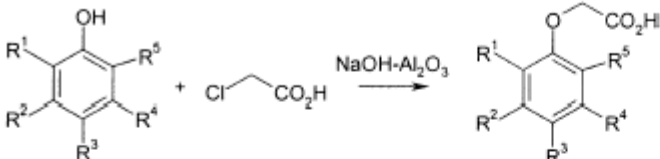
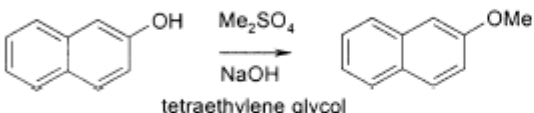
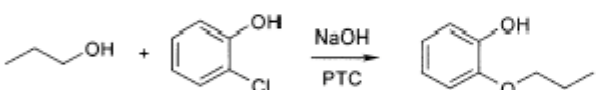
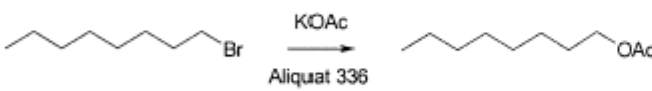
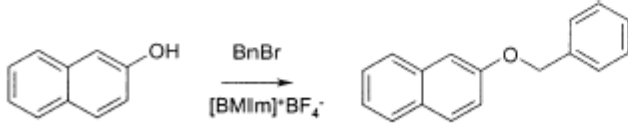
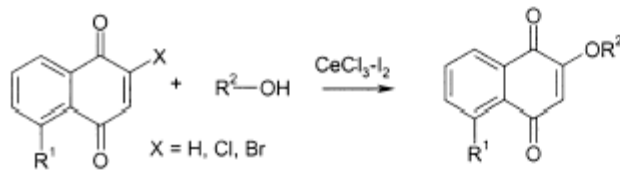
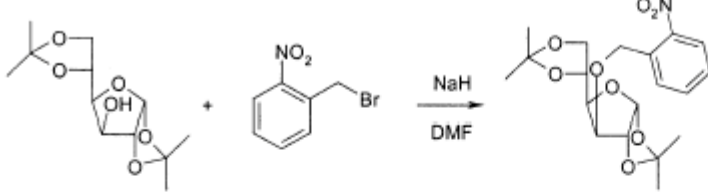
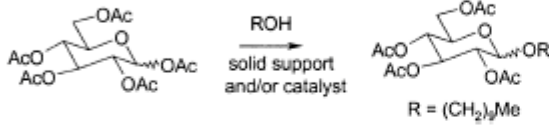
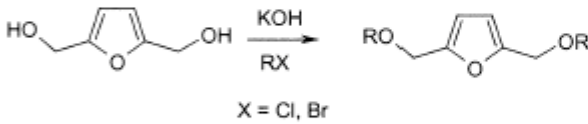
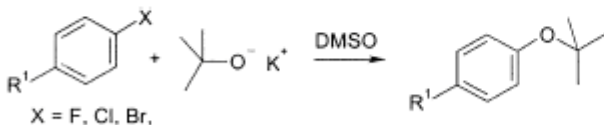
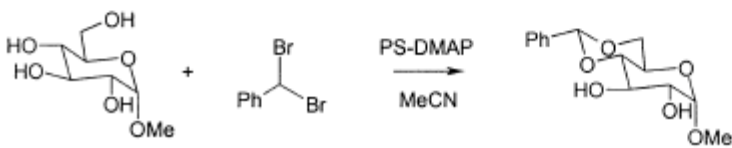
Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	N-acylation-, maleimides, yields=82–96% (7 examples)
	N-acylation-, maleimides, yields=59–84% (12 examples)
	N-acylation-, phthalimides, yield=94% (1 example)
	N-acylation, yields=85–96% (13 examples)
	N-acylation, yields=60–98% (11 examples)
	N-acylation, yields=92–97% (3 examples)
	N-sulfonylation, no yields quoted (4 examples)
	Hydrazide formation, yields=77–85% (4 examples)

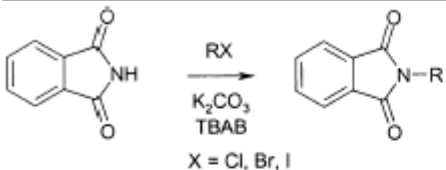
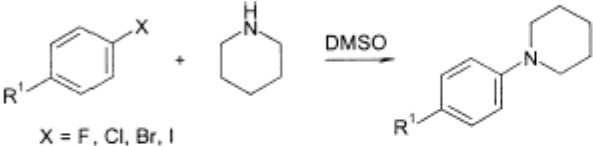
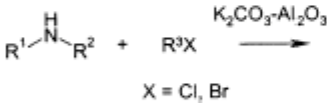
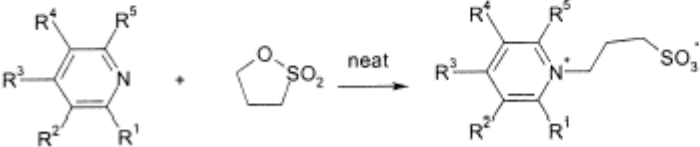
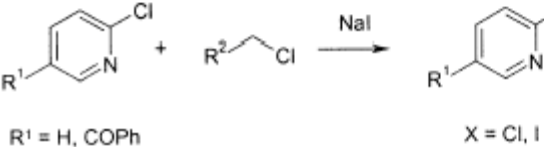
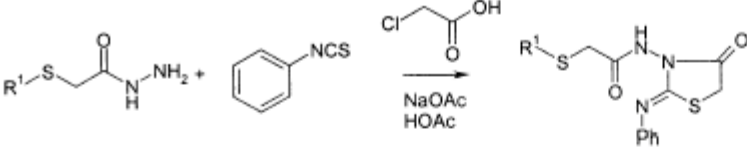
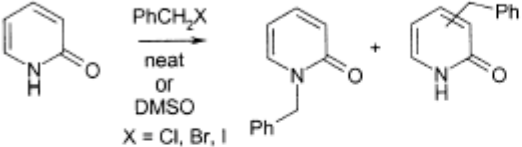
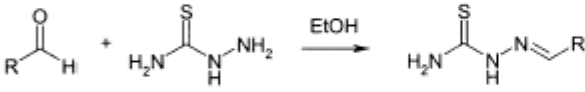
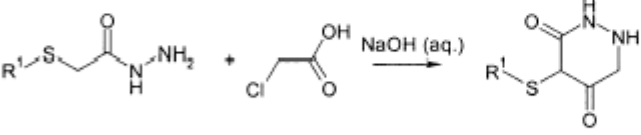
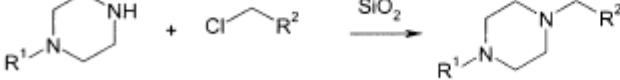
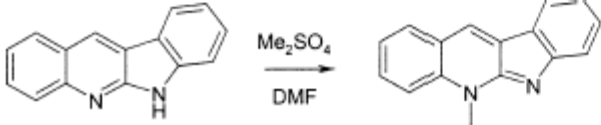
Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	<i>N</i> -acylation, yields=86 and 88% (2 examples)
	Urea formation, no yields quoted (5 examples)
	Urea formation, yields=40–90% (9 examples)
	<i>N</i> -acylation, yield=85% (1 example)
	<i>N</i> -acylation, yield=78% (1 example)
	<i>N</i> -acylation, yields=72–97% (6 examples)
	<i>N</i> -acylation, yield=84% (1 example)
	Thiourea formation, transamidation, yields=69–90% (6 examples)
	<i>N</i> -acylation, yields=55–91% (7 examples)
	<i>N</i> -acylation, yields=80–97% (12 examples)
	<i>N</i> -acylation, yields=30–96% (5 examples)
	<i>N</i> -acylation, yields=95 and 98% (2 examples)

Alkylation

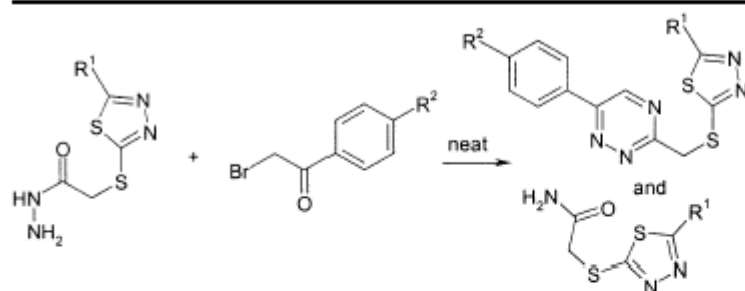
Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	C-alkylation-, Michael addition, yields=54–95% (8 examples)
	C-alkylation-, double Michael addition, yields=70–75 % (13 examples)
	C-alkylation-, Michael addition, yields=60–90% (8 examples)
	C-alkylation, yields=90–96 % (6 examples)
	Radical Michael addition reaction, yield=77% (1 example)
	N-alkylation-, Michael addition, yield=59% (1 example)

Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	<i>N</i> -alkylation-, Michael addition, yields=25–100% (11 examples)
	<i>N</i> -alkylation-, ring opening of epoxides, yields=83–95% (15 examples)
	<i>N</i> -alkylation-, ring opening of epoxides, yields=70–85% (15 examples)
	<i>N</i> -alkylation-, ring opening of epoxides, yields=90 and >90% (2 examples)
	Ring formation via ring opening of epoxides, yield=82% (1 example)
	Selenide ethers-, ring opening of epoxides, yields=73–87% (13 examples)
	<i>O</i> -alkylation-, allylation, yields=52–71% (3 examples)
	<i>O</i> -alkylation, yields=63–88% (8 examples)
	<i>O</i> -alkylation-, catalytic etherification, yields=8–76% (7 examples)
	<i>O</i> -glycosidation, yields=3–77% (3 examples)
	<i>O</i> -alkylation-, Williamson reaction, yields=48–100% (13 examples)
	<i>O</i> -alkylation, yields=61–99% (9 examples)

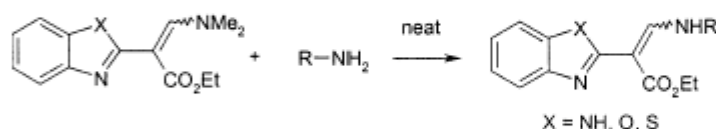
Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	<i>O</i> -alkylation, yields=55–76% (9 examples)
	<i>O</i> -alkylation, yield=50–70% (1 example)
	<i>O</i> -alkylation, yields=63–82% (8 examples)
	<i>O</i> -alkylation, yield=80% (1 example)
	<i>O</i> -alkylation, yields=75–90% (10 examples) alkylation with ionic liquids as the solvent
	<i>O</i> -alkylation, yields=57–90% (8 examples)
	<i>O</i> -alkylation, yields=68–96% (7 examples)
	<i>O</i> -glycosidation, yields=7–77% (14 examples)
	<i>O</i> -alkylation, yields=74–94% (7 examples)
	<i>O</i> -alkylation, yields=31–81% (4 examples)
	Benzylidene formation, yields= 76 and 83% (2 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
 $\text{X} = \text{Cl, Br, I}$	<i>N</i> -alkylation, yields=49–95% (9 examples)
 $\text{X} = \text{F, Cl, Br, I}$	<i>N</i> -alkylation, yields=9–93% (9 examples)
 $\text{X} = \text{Cl, Br}$	<i>N</i> -alkylation, yields=43–98% (8 examples)
	<i>N</i> -alkylation-, sulfopropylation, yields=68–95% (8 examples)
 $\text{R}^1 = \text{H, C(=O)Ph}$ $\text{X} = \text{Cl, I}$	<i>N</i> -alkylation-, quaternisation, yields=0–91% (10 examples)
	<i>N</i> -alkylation, yields=71–79% (3 examples)
 $\text{X} = \text{Cl, Br, I}$	<i>N</i> -alkylation, no yields quoted (12 examples)
	<i>N</i> -alkylation thiosemicarbazones, yields=79–91% (7 examples)
	<i>N</i> -alkylation, yields=77 and 81% (2 examples)
	<i>N</i> -alkylation, yields=75–99% (3 examples)
	<i>N</i> -methylation, yield=75% (1 example)

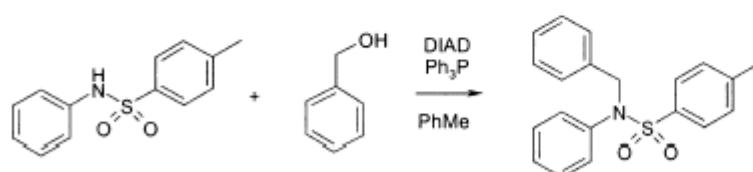
Conditions

Type of reaction/yields/
number of examples

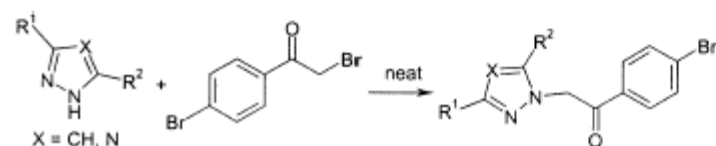
N-alkylation, yields=74–86%
(8 examples) one molecule of the
phenacyl bromide, undergoes
N-alkylation and condensation
with two molecules of the
acetylhydrazide



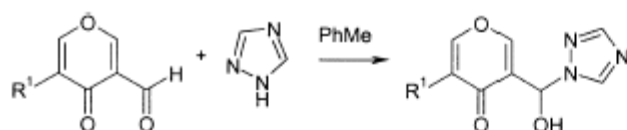
Transamination, yields=90–98% (11 examples)
E/Z=90:10–100:0.



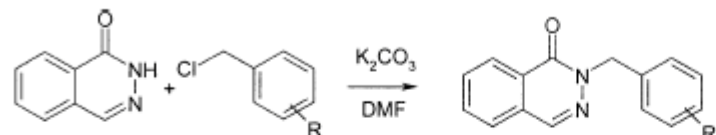
N-alkylation-, Mitsunobu
reaction, yields=83–93%
(4 examples)



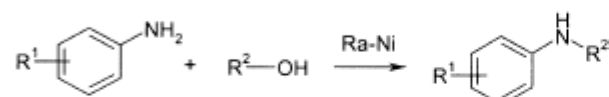
N-alkylation of heterocycles,
yields=80–98% (5 examples)



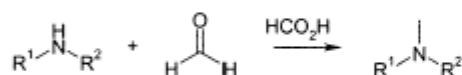
N-alkylation of heterocycles,
yields=78–90% (6 examples)



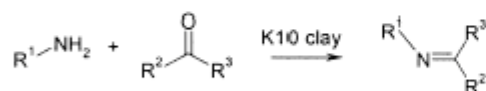
N-alkylation of heterocycles,
yields=52–75% (8 examples)



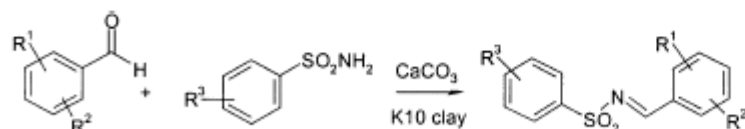
N-alkylation of anilines,
yields=19–91% (12 examples)



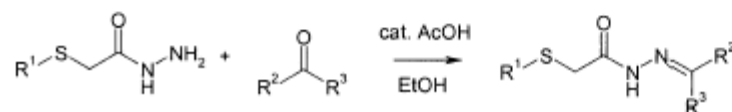
N-methylation, yields=43–76%
(5 examples)



Imine and enamine formation,
yields=75–97% (10 examples)

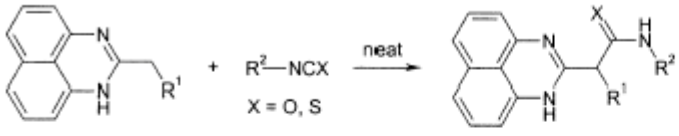
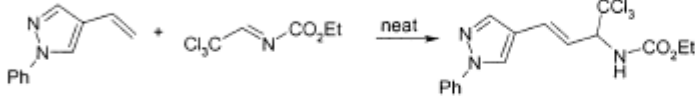
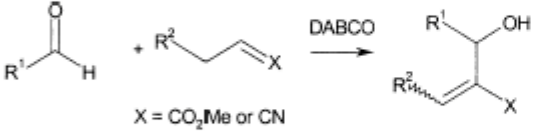
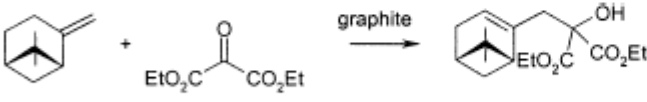
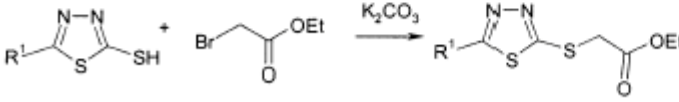
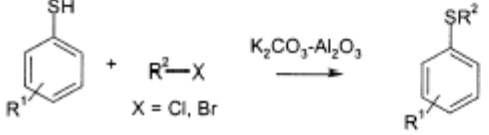
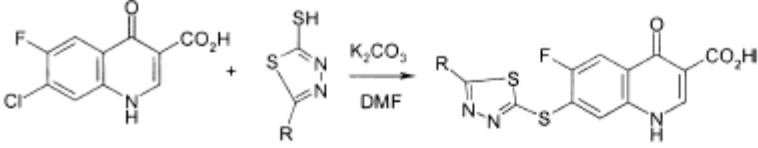
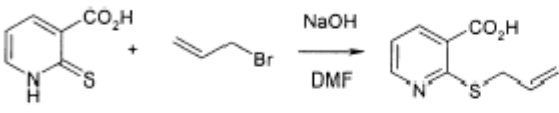
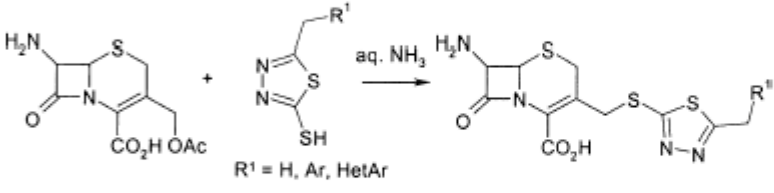
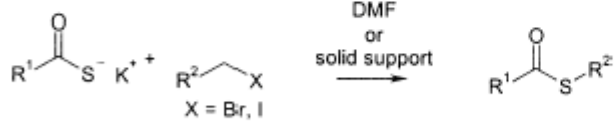
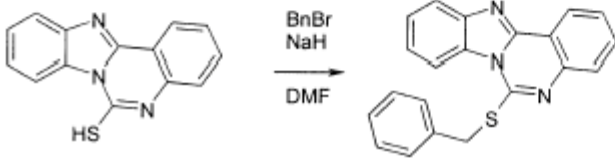


Sulfonylimine formation,
yields=52–91% (11 examples)

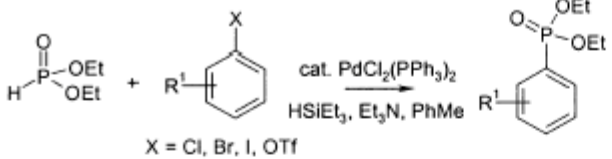
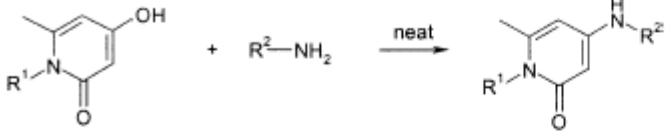
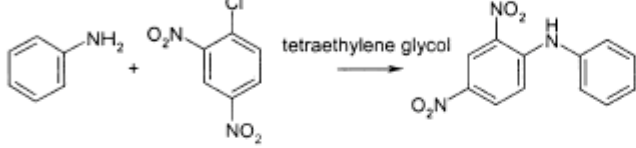
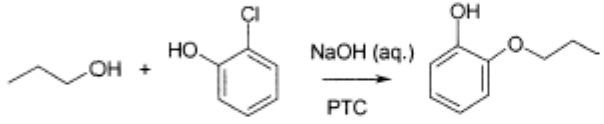
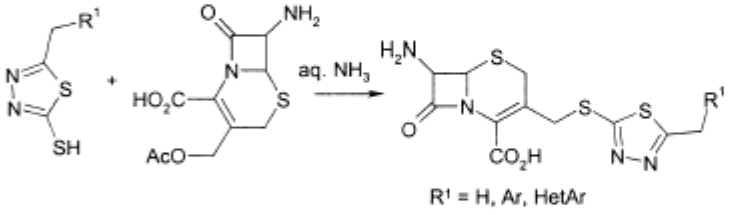
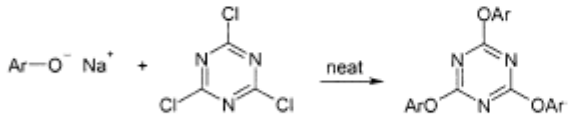
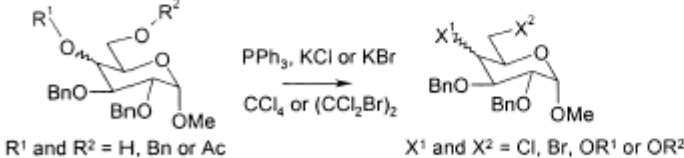
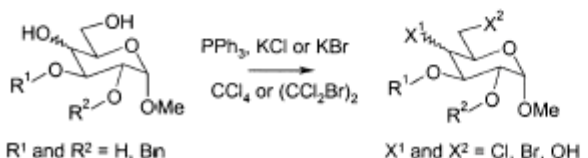
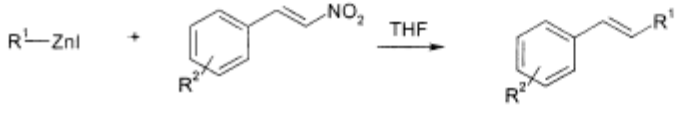


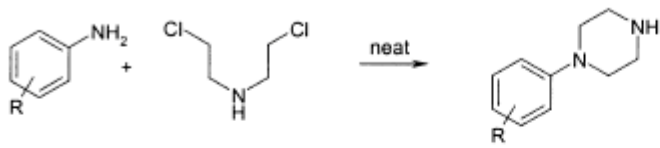
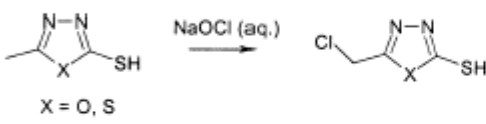
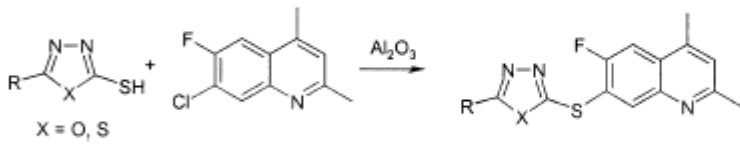
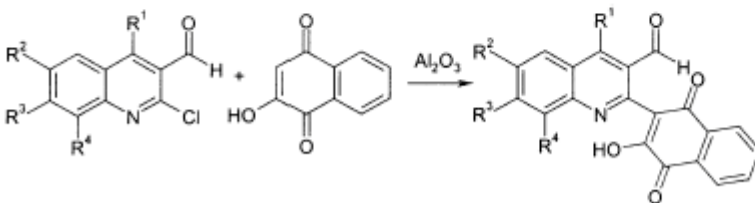
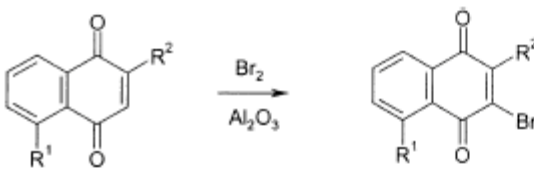
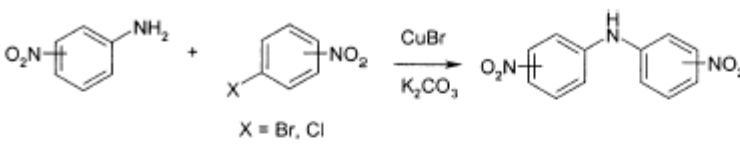
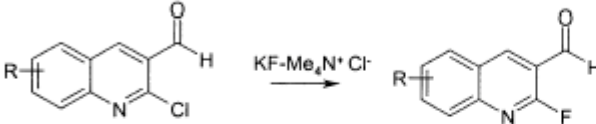
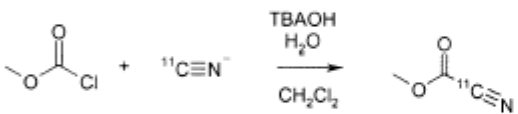
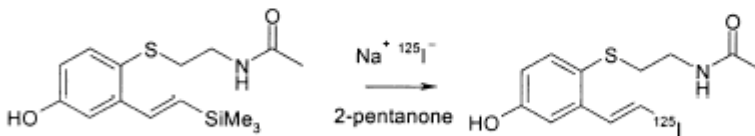
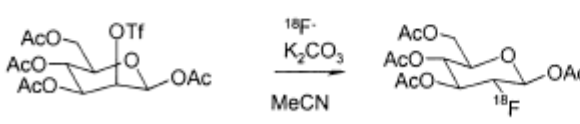
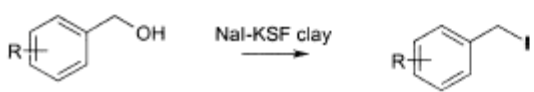
N-alkylation-, condensation to
form hydrazone, yields=92–95%
(10 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	<i>N</i> -alkylation condensation to form hydrazone, yields=94–98% (12 examples)
X = Br, Cl	C-alkylation of ethyl acetoacetate, yields=59–82% (5 examples)
X = Br, I	C-alkylation of activated methylenes, yields=48–79% (5 examples)
	C-alkylation-, synthesis of 2-hydroxyquinones, yields=75–95% (14 examples)
	C-alkylation, yields=90–98% (11 examples)
M = Li, Na	C-alkylation, yields=72–95% (3 examples)
	C-alkylation-, Michael addition, yields=55–75% (4 examples)
	C-alkylation, yields=46–100% (16 examples)
	C-alkylation, yields=40–96% (6 examples)
	C-alkylation, yields=85–95% (3 examples)

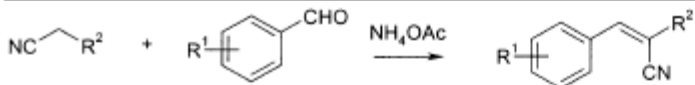
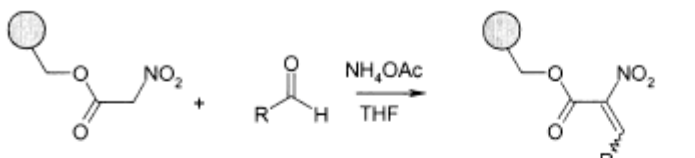
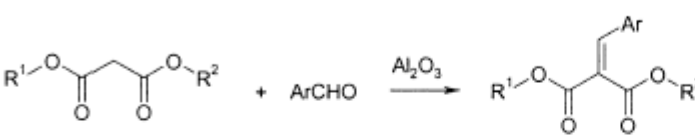
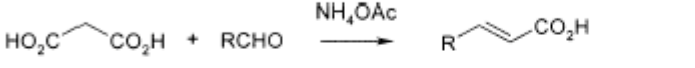
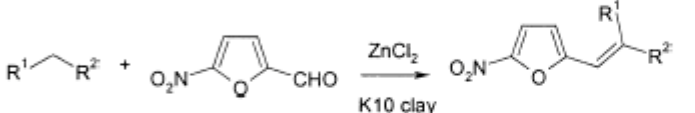
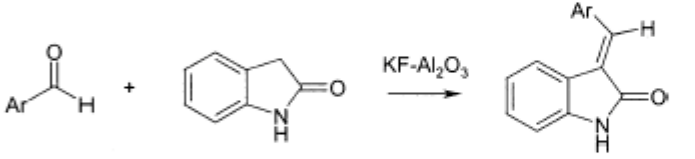
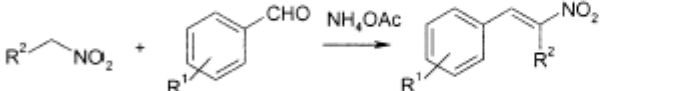
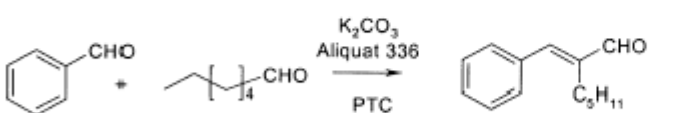
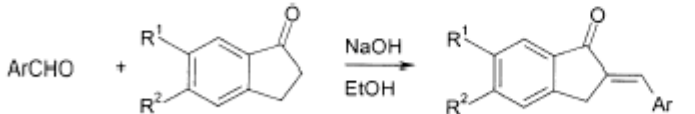
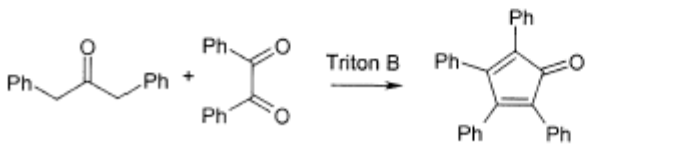
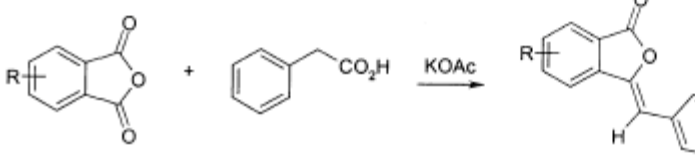
Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	C-alkylation-, addition to isocyanates, yields=75–80% (4 examples)
	C-alkylation, yields=22–70% (5 examples)
	C-alkylation, yields=10–95% (12 examples)
	C-alkylation carbonyl-ene reaction, yields=50–80% (3 examples)
	S-alkylation, yields=82–86% (4 examples)
	S-alkylation, yields=70–98% (3 examples)
	S-arylation, yields=50–72% (6 examples)
	S-alkylation, yields=57–81% (7 examples)
	S-alkylation, yields=80–85% (5 examples)
	S-alkylation, yields=40–100% (17 examples)
R¹ = Me, Ph R² = alkyl alcohol, 2'-deoxynucleoside	
	S-alkylation, yields=85–95% (3 examples)

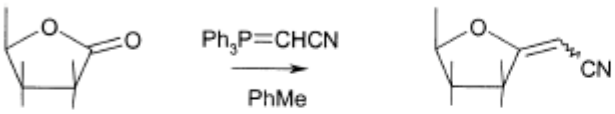
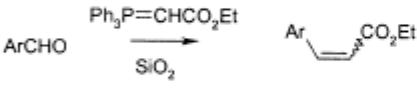
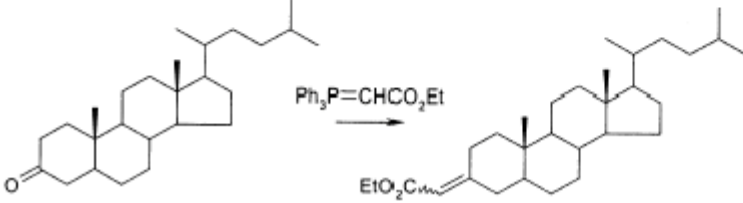
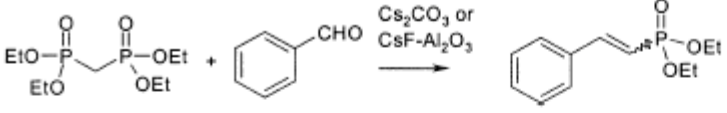
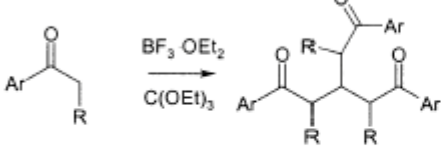
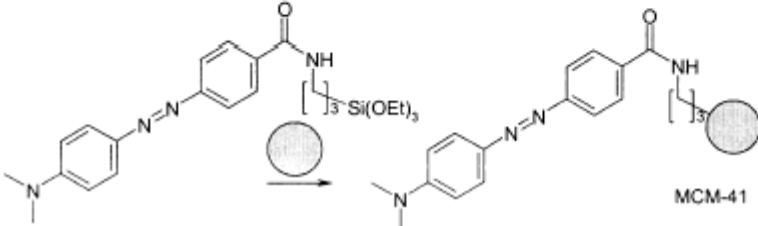
Aromatic and nucleophilic substitution

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
 X = Cl, Br, I, OTf	Phosphonation of aryl halides, yields=0–87% (18 examples)
	Aromatic nucleophilic substitution, yields=60–91% (11 examples)
	Aromatic nucleophilic substitution, yields=70–85% (1 example)
	Aromatic nucleophilic substitution, yields=63–82% (8 examples)
 R¹ = H, Ar, HetAr	Nucleophilic substitution, yields=80–85% (5 examples)
	Aromatic nucleophilic substitution, yields=85–90% (12 examples)
 R¹ and R² = H, Bn or Ac X¹ and X² = Cl, Br, OR¹ or OR²	Halogenation of carbohydrates, yields=40–91% (7 examples)
 R¹ and R² = H, Bn X¹ and X² = Cl, Br, OH	Halogenation of carbohydrates, yields=25–95% (16 examples)
	Substitution of NO ₂ group, yields=76–83% (9 examples)

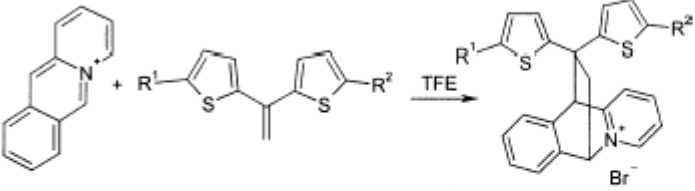
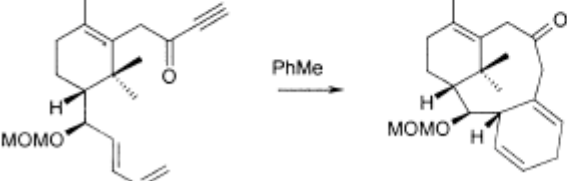
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Arylpiperazine formation, yields=47–73% (7 examples)
 X = O, S	Chlorination of heterocycles, yields=89–95% (6 examples)
 X = O, S	Aromatic nucleophilic substitution, yields=75–80% (6 examples)
	Aromatic nucleophilic substitution, yields=70–82% (5 examples)
	Bromination of quinones, yields=80–96% (17 examples)
 X = Br, Cl	Synthesis of dinitrophenylamines, yields=17–68% (4 examples)
	Halogenation, yields=66–96% (5 examples)
	Nucleophilic substitution, no yield quoted. (1 example)
	Halogenation, yield=48% (1 example)
	Halogenation, yield=90% (1 example)
	Halogenation, yields=55–90% (4 examples)

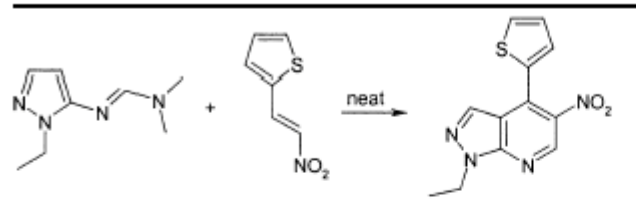
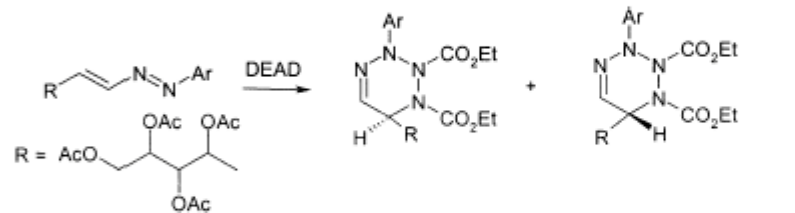
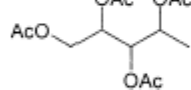
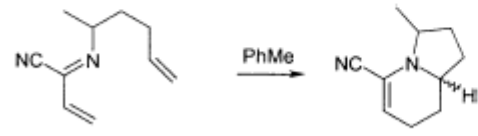
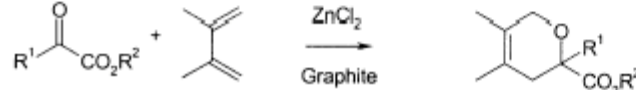
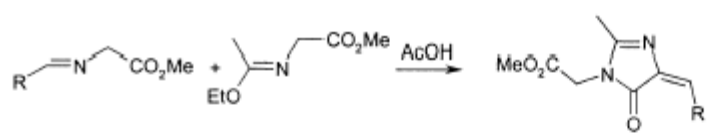
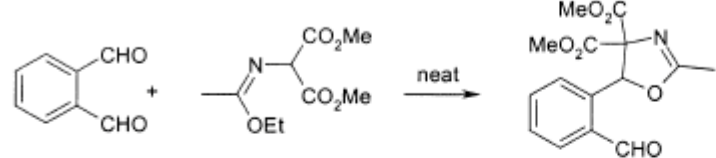
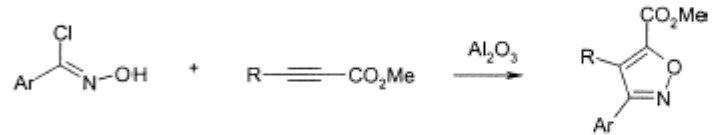
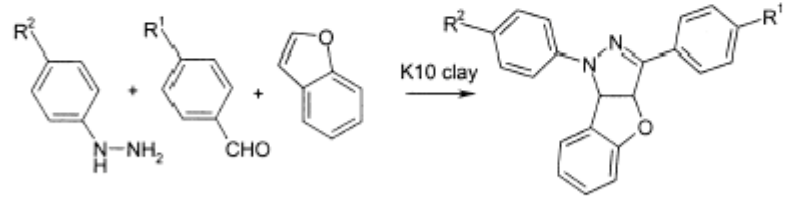
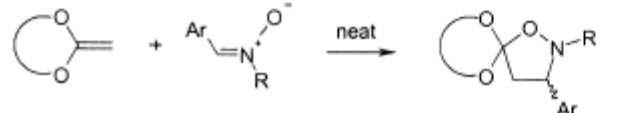
Condensation

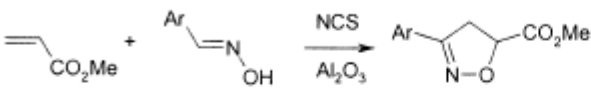
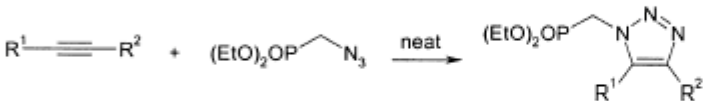
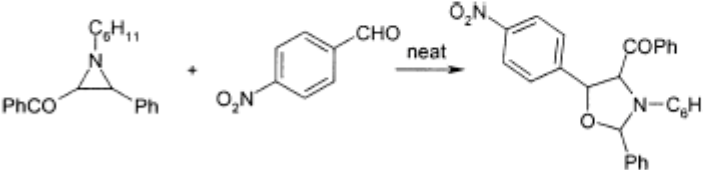
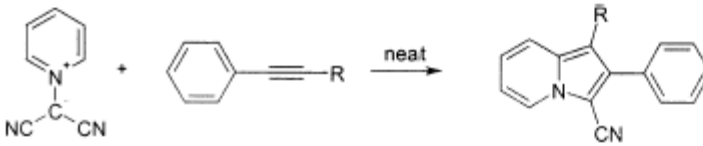
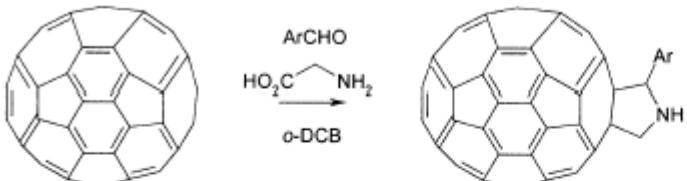
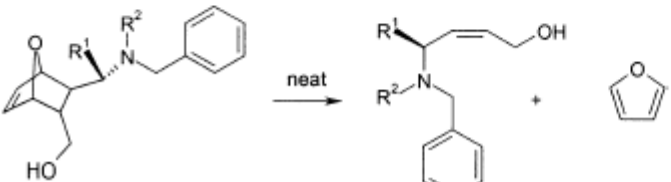
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
$\text{NC-CH}_2\text{-R}^2 + \text{R}^1\text{-C}_6\text{H}_4\text{-CHO} \xrightarrow{\text{NH}_4\text{OAc}}$ 	Knoevenagel condensation, yields=89–97% (15 examples)
	Knoevenagel condensation, no yields quoted. (5 examples)
$\text{R}^1\text{-O-CO-CH}_2\text{-CO-OR}^2 + \text{ArCHO} \xrightarrow{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 	Knoevenagel condensation, yields=70–96% (7 examples)
$\text{HO}_2\text{C-CH}_2\text{-CO}_2\text{H} + \text{RCHO} \xrightarrow{\text{NH}_4\text{OAc}}$ 	Knoevenagel condensation, yields=95–98% (10 examples)
$\text{R}^1\text{-CH}_2\text{-R}^2 + \text{O}_2\text{N-C}_5\text{H}_3\text{(O)-CHO} \xrightarrow[\text{K10 clay}]{\text{ZnCl}_2}$ 	Knoevenagel condensation, yields=62–98% (8 examples)
$\text{ArCHO} + \text{indole-2-carboxaldehyde} \xrightarrow{\text{KF-Al}_2\text{O}_3}$ 	Knoevenagel condensation, yields=69–94% (8 examples)
$\text{R}^2\text{-CH}_2\text{-NO}_2 + \text{R}^1\text{-C}_6\text{H}_4\text{-CHO} \xrightarrow{\text{NH}_4\text{OAc}}$ 	Knoevenagel condensation-, Henry reaction, yields=80–92% (11 examples)
$\text{C}_6\text{H}_5\text{-CHO} + \text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{-CHO} \xrightarrow[\text{PTC}]{\text{K}_2\text{CO}_3, \text{Aliquat 336}}$ 	Aldol condensation, yield=82% (1 example)
$\text{ArCHO} + \text{R}^1\text{-R}^2\text{-indole-2-carboxaldehyde} \xrightarrow[\text{EtOH}]{\text{NaOH}}$ 	Aldol condensation, yields=85–100% (22 examples)
$\text{Ph-CH}_2\text{-CO-CH}_2\text{-Ph} + \text{Ph-CO-CH}_3 \xrightarrow{\text{Triton B}}$ 	Aldol condensation, yield=75% (1 example)
$\text{R-C}_6\text{H}_3\text{(CO}_2\text{)}_2 + \text{C}_6\text{H}_5\text{-CH}_2\text{-CO}_2\text{H} \xrightarrow{\text{KOAc}}$ 	Gabriel synthesis of phthalides, yields=20–89% (11 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Wittig olefination, yields=85–98% (8 examples)
	Wittig olefination, yields=82–96% (7 examples)
	Wittig olefination, yields=76–86% (4 examples)
	Horner olefination, yields=72 and 74% (2 examples)
	Condensation with triethyl orthoformate, yields=55–85% (10 examples)
	Hydrothermal co-condensation, no yields quoted (2 examples)

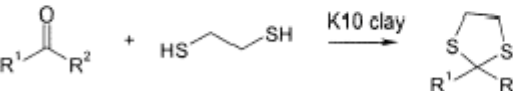
Cycloaddition

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Diels–Alder reaction, yields=58–78% (6 examples)
	Intramolecular Diels–Alder reaction, yield=30–40% (1 examples) stereoselective cycloaddition approach to Taxoid skeleton

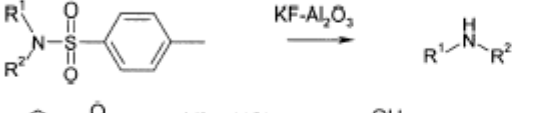
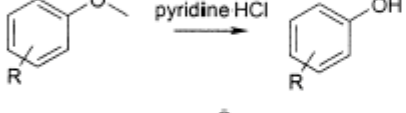
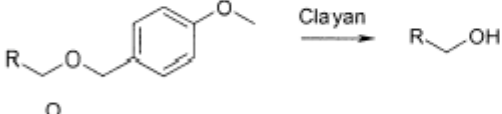
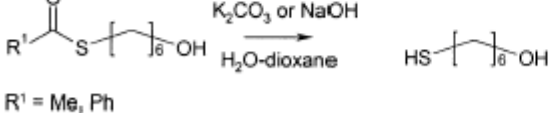
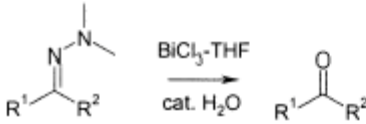
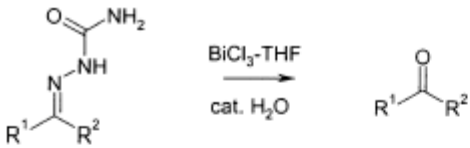
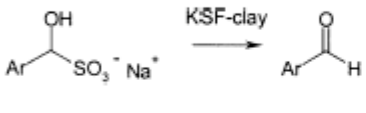
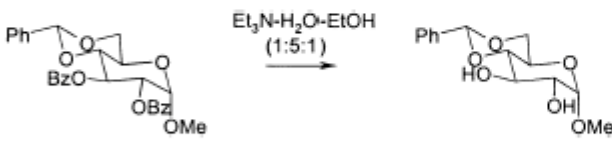
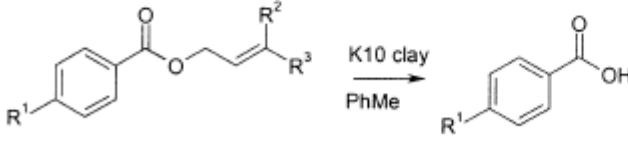
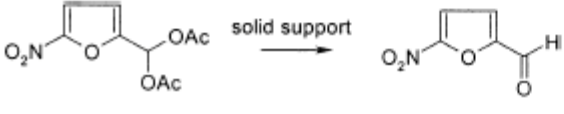
Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	Hetero Diels-Alder reaction, yields=32–84% (7 examples)
 R = 	Hetero Diels-Alder reaction, yields=80–96% diastereomeric ratio=85:15–35:65 (6 examples)
	Intramolecular hetero Diels-Alder reaction, yield=70% (1 example)
	Hetero Diels-Alder reaction, yields=54–87% (3 examples)
	1,3-Dipolar cycloaddition using imidates, yields=71–98% (6 examples)
	Hetero 1,3-dipolar cycloaddition, yield=83% (1 example)
	1,3-Dipolar cycloaddition using nitrile imines or nitrile oxides, yields=0–85% (20 examples)
	1,3-Dipolar cycloaddition-, multicomponent reaction, yields=60–75% (14 examples)
	1,3-Dipolar cycloaddition using nitrones, yields=70–95% (10 examples)

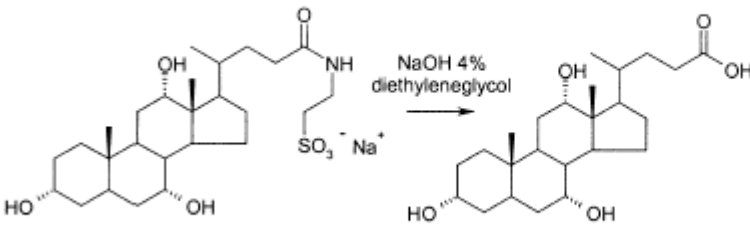
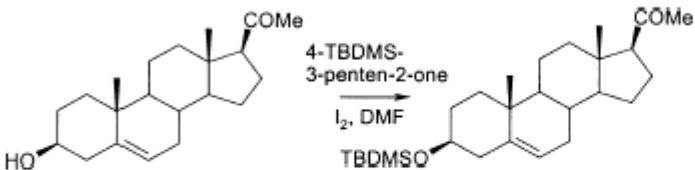
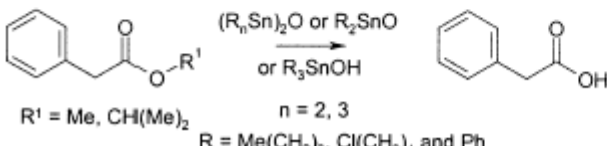
Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	1,3-Dipolar cycloaddition using nitrile oxides, yields=55–77% (8 examples)
	Hetero 1,3-dipolar cycloaddition using azidomethyl phosphonates, yields=40–99% (5 examples)
	Carbonyl 1,3-dipolar cycloaddition using azidomethine ylide, yields=35–80% (6 examples)
	1,3-Dipolar cycloaddition using azidomethine ylide, yields=46 and 87% (2 examples)
	1,3-Dipolar cycloaddition to C ₆₀ -fullerene, yields=15–37% (3 examples)
	Cycloaddition to C ₆₀ -fullerene, yields=9–26% (5 examples)
	Retro Diels–Alder, yields=50–84% (5 examples)

Deprotection and protection

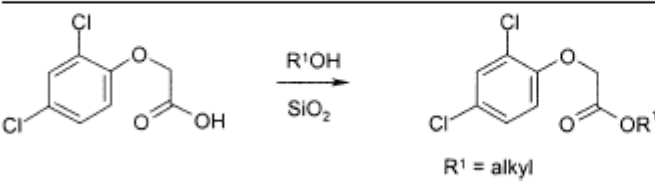
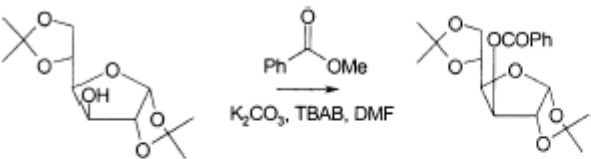
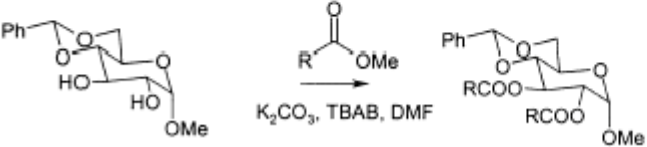
Conditions	Type of reaction/yields/ number of examples
	1,3-Dithiolanes from carbonyl compounds, yields=70–90% (7 examples)

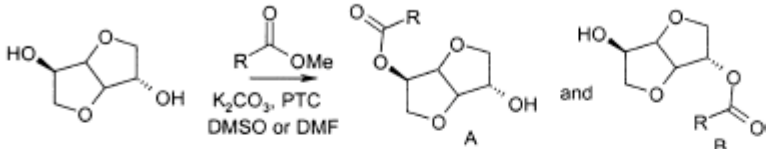
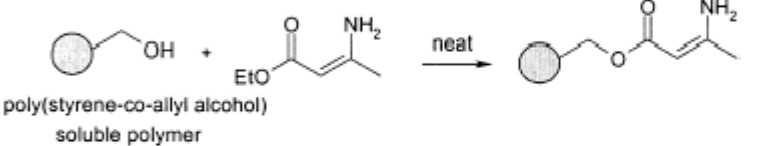
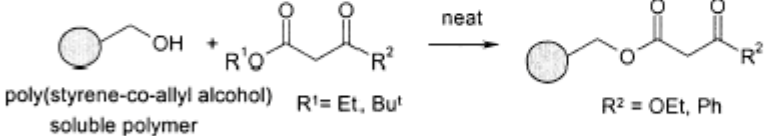
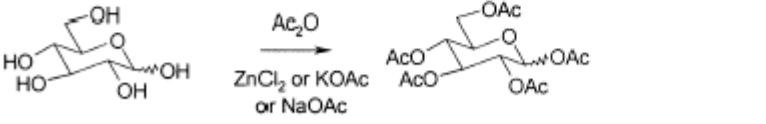
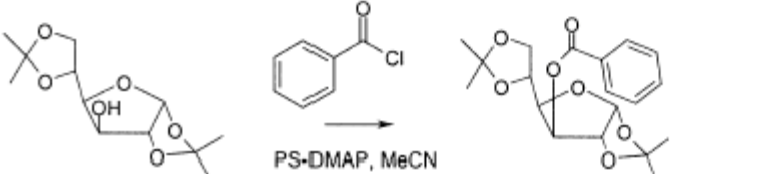
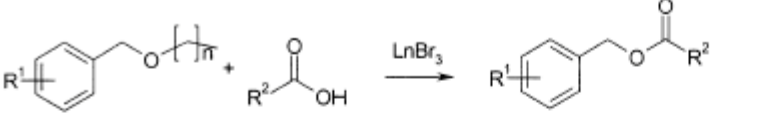
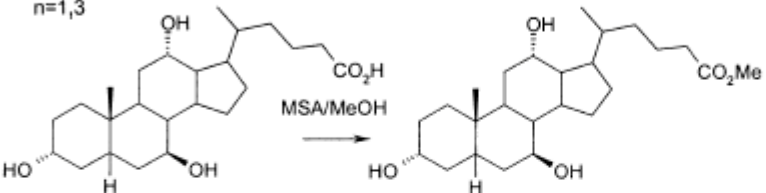
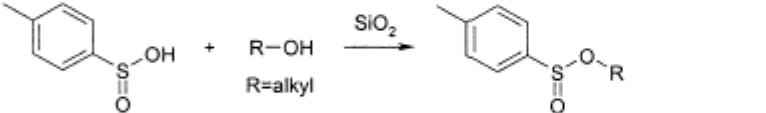
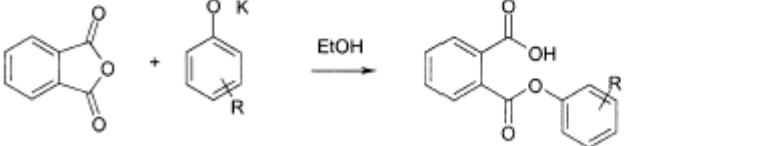
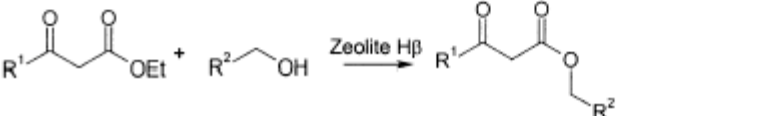
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
$R^1-C(=O)-R^2 + HO-(CH_2)_n-OH \xrightarrow{\text{Envirocat EPZG}} R^1-C(=O)-R^2$ $n = 1, 2$	Acetalization and ketalization of carbonyls, yields=40–97% (11 examples)
$R-CHO + Ac_2O \xrightarrow{\text{K10 clay}} R-CH(OAc)-OAc$	Acylal formation, yields=75–98% (12 examples)
Reaction of a substituted tetrahydropyran with benzyl bromide ($Ph-CH_2-Br$) in the presence of PS-DMAP in MeCN to form a benzylidene acetal.	Benzylidene formation, yields=76 and 83% (2 examples) solid supported reagent
$R^1-C(=O)-R^2 \xrightarrow[SiO_2]{NH_2OH \cdot HCl} R^1-C(=N-OH)-R^2$	Oximes from carbonyl compounds, yields=0–94% (18 examples)
$R^1-CH(OH)-R^2 + \text{tetrahydropyran} \xrightarrow[SiO_2]{H_2SO_4} R^1-CH(O-THP)-R^2$	Protection of alcohols as tetrahydropyranyl ethers, yields=80–92% (11 examples)
$R^1-C(=O)-R^2 \xrightarrow{\text{Clayan}} R^1-C(=O)-R^2$	Acetal deprotection, yields=70–90% (7 examples)
$R^1-C(=O)-R^2 \xrightarrow{\text{Clayan}} R^1-C(=O)-R^2$	Thioacetal deprotection, yields=80–89% (13 examples)
Reaction of a Boc-protected amine derivative with SiO_2 to remove the Boc group.	<i>N</i> -Boc deprotection, yields=56–98% (12 examples) example of chemoselective deprotection.
$R-OTMS \xrightarrow[\text{cat. } PdCl_2(PhCN)_2 \text{ and cat. } H_2O]{\text{K10 clay or}} R-OH$	Trimethylsilyl ether deprotection, yields=88–100% (22 examples)
$R^1-CH(OTMS)-R^2 \xrightarrow[Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O]{\text{K10 clay}} R^1-C(=O)-R^2$	Oxidative deprotection of silyl ethers, yields=70–95% (8 examples)
$R^1-CH(O-THP)-R^2 \xrightarrow{\text{Clayan}} R^1-CH(OH)-R^2$	Deprotection of tetrahydropyranyl ethers, yields=76–90% (9 examples)
$R^1-CH(O-THP)-R^2 \xrightarrow[Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O]{\text{K10 clay}} R^1-C(=O)-R^2$	Deprotection of tetrahydropyranyl ethers, yields=80–90% (9 examples)

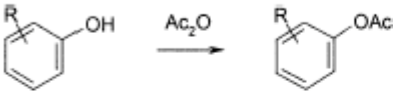
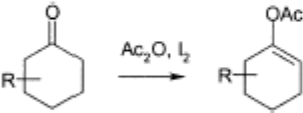
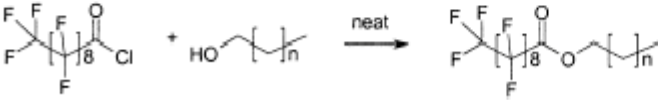
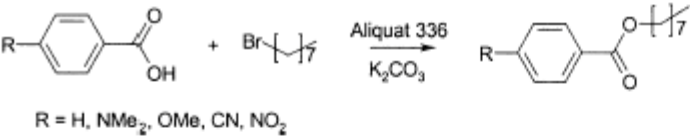
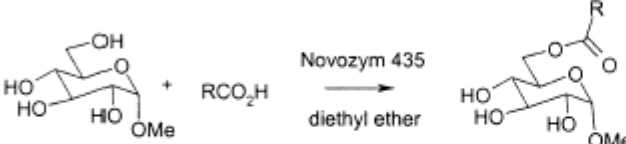
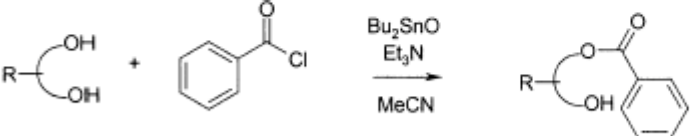
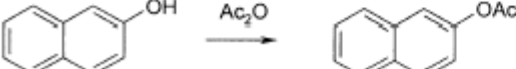
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Cleavage of sulfonates, yields=83–90% (14 examples)
	Cleavage of sulfonamides, yields=76–85% (11 examples)
	Cleavage of alkyl ethers, yields=74–95% (11 examples)
	Cleavage of benzyl ethers, yields=70–88% (13 examples)
 $R^1 = \text{Me, Ph}$	S-acyl deprotection, yields=100% (4 examples)
	Regeneration of carbonyls from hydrazones, yields=75–98% (11 examples)
	Regeneration of carbonyls from semicarbazones, yields=55–90% (14 examples)
	Regeneration of carbonyls from oximes, yields=90–97% (14 examples)
	Regeneration of aldehydes from bisulfites, yields=85–98% (12 examples)
	Deprotection of benzyl groups, yields=71–78% (3 examples)
	Ester hydrolysis, yields=0–97% (20 examples)
	Deacylation, yields=5–99% (4 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Basic amide hydrolysis Yield=86% (1 example)
	Silylation, yields=63–99% (8 examples)
	Silylation, yields=56–82% (8 examples)
 $R^1 = \text{Me}, \text{CH}(\text{Me})_2$ $n = 2, 3$ $R = \text{Me}(\text{CH}_2)_3, \text{Cl}(\text{CH}_2)_4 \text{ and Ph}$	Saponification, yields=0–100% (12 examples)

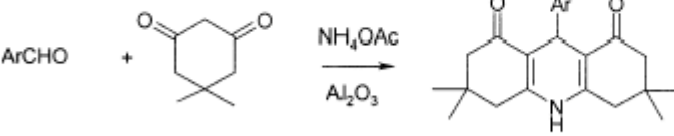
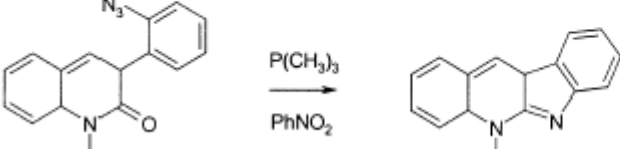
Esterification and transesterification

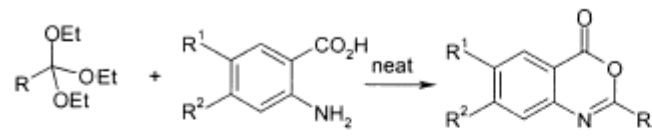
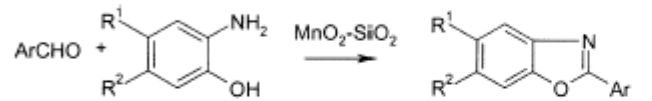
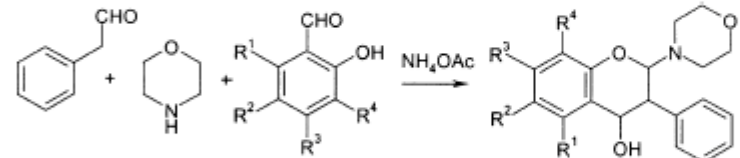
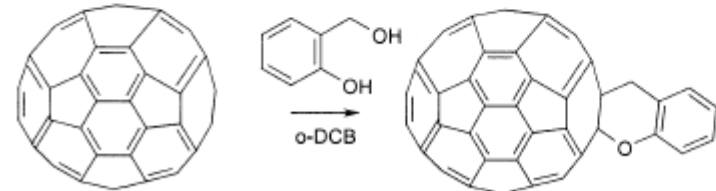
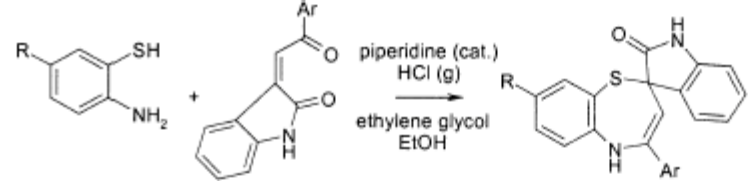
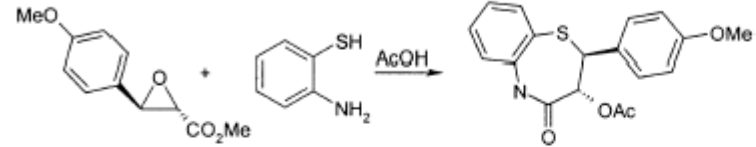
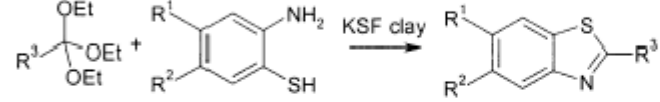
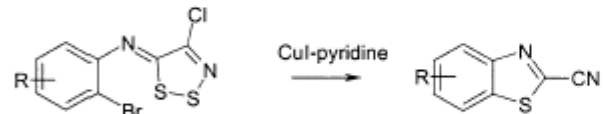
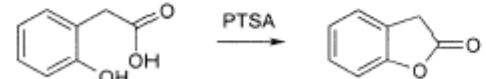
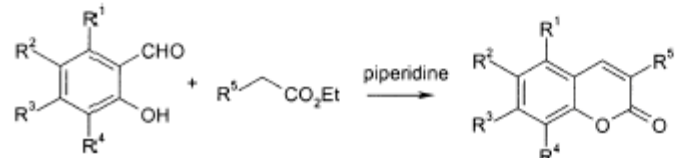
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
 $R^1 = \text{alkyl}$	Esterification of 2,4-dichlorophenoxy-acetic acid, yields=95–99% (9 examples)
	Transesterification-, benzoylation, yields=60–96% (7 examples)
	Transesterification-, mixture of monoesterification and diesterification, yields=15–100% (9 examples)

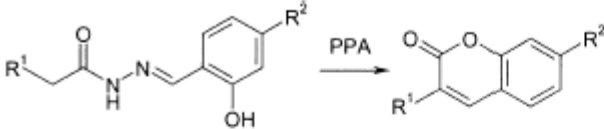
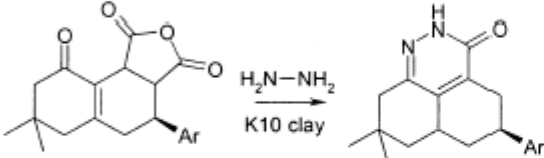
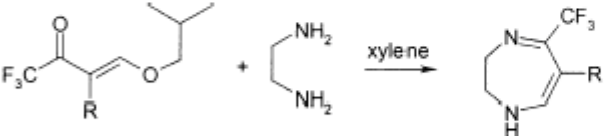
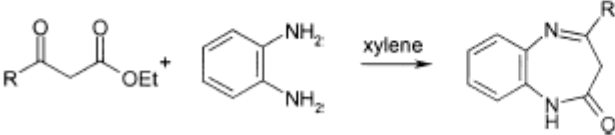
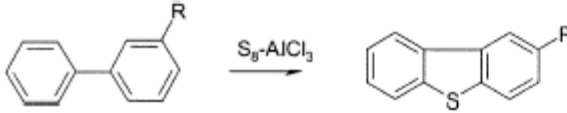
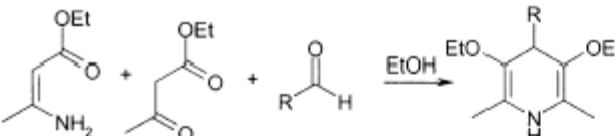
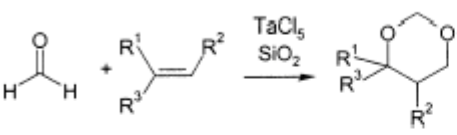
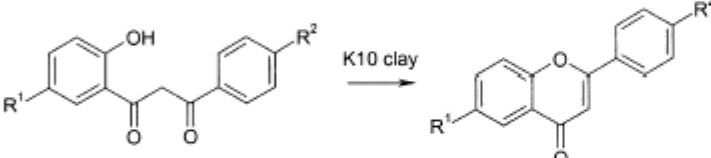
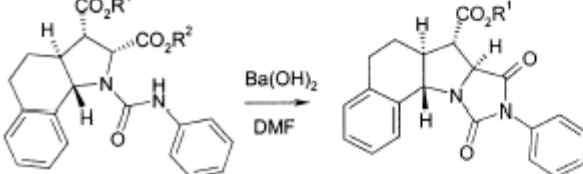
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Transesterification-, mixture of products, yields=44–63% (5 examples)
 poly(styrene-co-allyl alcohol) soluble polymer	Transesterification-, polymer-bound product was further elaborated, no yield quoted (1 example)
 poly(styrene-co-allyl alcohol) soluble polymer $R^1 = \text{Et, Bu}^t$ $R^2 = \text{OEt, Ph}$	Transesterification-, polymer-bound product was further elaborated, no yields quoted (3 examples)
	Peracetylation, yields=80–98% (6 examples)
 PS-DMAP, MeCN	Esterification-, solid supported reagent, yields=68–96% (9 examples)
 $n=1,3$	Esterification LnBr_3 catalysed, yields=41–84% (17 examples)
 MSA/MeOH	Esterification, yield=97% (1 example)
 $R = \text{alkyl}$	Sulfonate esters, yields=65–95% (10 examples)
	Synthesis of orthophthalic acid monoesters, yields=28–90% (8 examples)
	Transesterification, yields=60–95% (6 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Esterification, yields=92–98% (4 examples)
	Esterification of enols, yields=0–90% (10 examples)
	Esterification-, derivatization, no yields quoted (6 examples)
 R = H, NMe₂, OMe, CN, NO₂	Esterification, yields=95–100% (5 examples)
	Esterification-, enzymatic, yields=92 and 97% (2 examples)
	Selective esterification, yields=0–92% (4 examples)
	O-acylation, yield=60–80% (1 example)

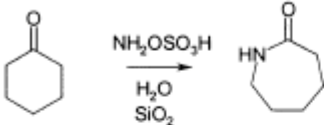
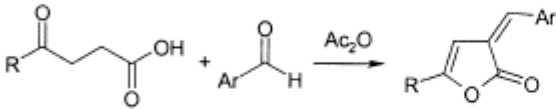
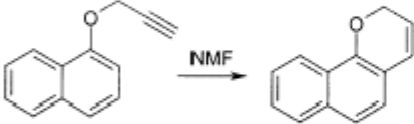
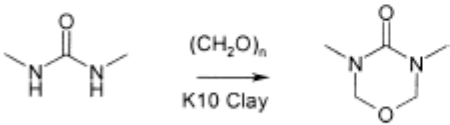
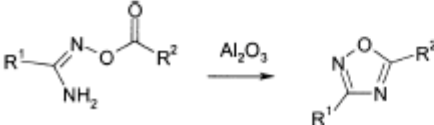
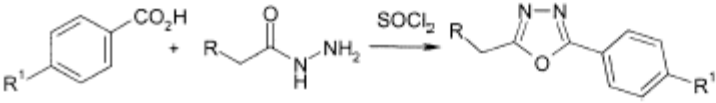
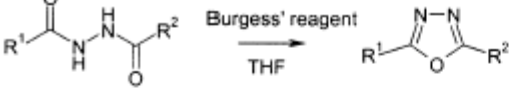
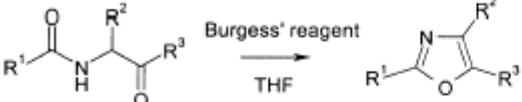
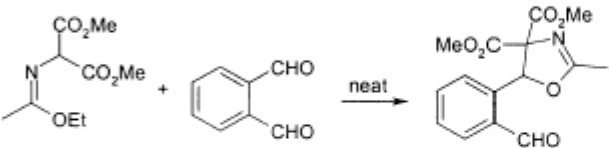
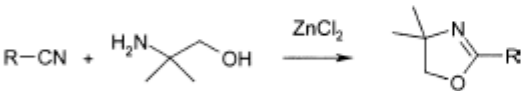
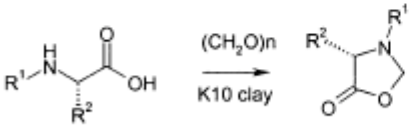
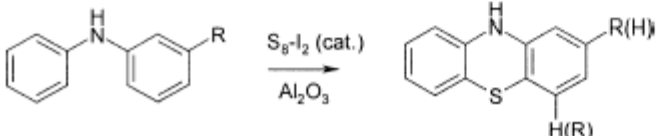
Heterocycles

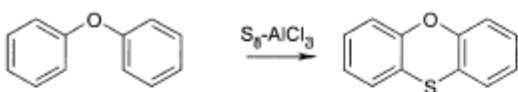
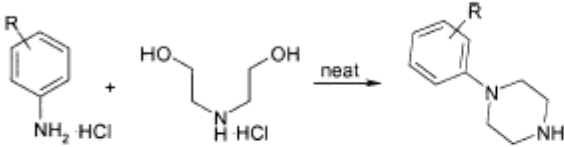
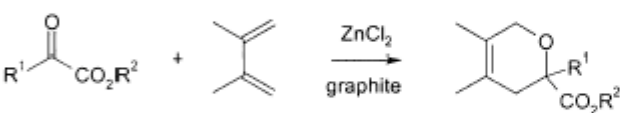
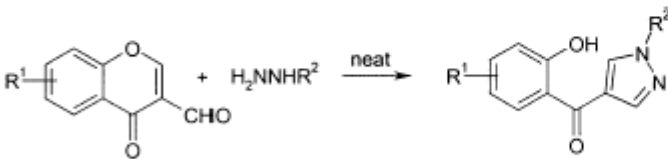
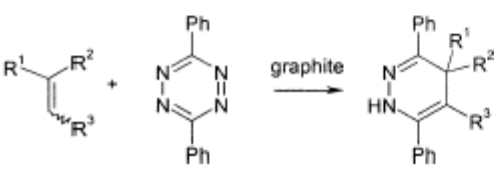
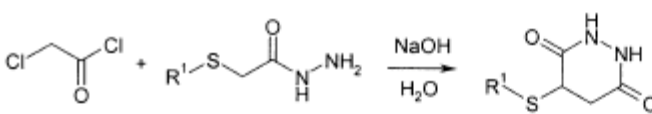
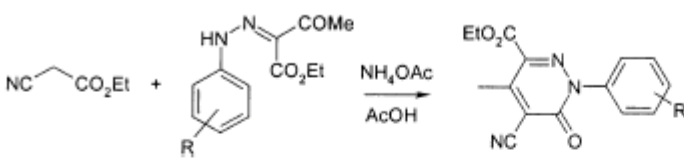
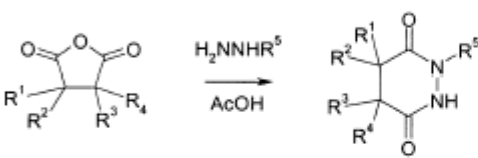
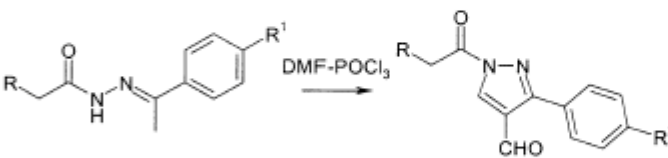
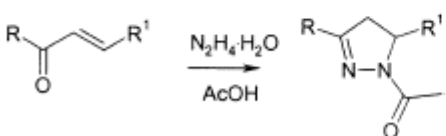
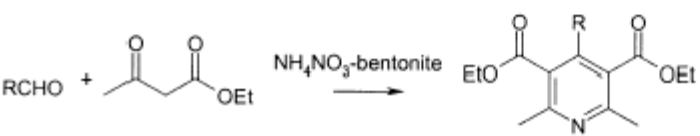
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Acridine, yields=50–70% (5 examples)
	Acridone, yields=70–85% (5 examples)
	Azaindole Aza-Wittig reaction, yield=40% (1 example)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Benzoxazinone, yields=76–94% (6 examples)
	Benzoxazole, yields=84–97% (17 examples)
	Benzopyran, yields=71–88% (11 examples)
	Benzopyran, yields=21 and 27% (2 examples)
	Benzothiazepine, yields=53–65% (5 examples)
	Benzothiazepinone-, reversible diastereoselectivity, yields=75 and 84% (2 examples)
	Benzothiazole, yields=70 and 74% (2 examples)
	Benzothiazole, yields=70 and 74% (2 examples)
	Coumaran-2-one, yield=85% (1 example)
	Coumarin, yields=55–94% (16 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Coumarin, yields=55–68% (4 examples)
	Diazaphenylene, yields=54–81% (3 examples)
	Diazepine, yields=73 and 77% (2 examples)
	Diazepinone, yields=82–98% (11 examples)
	Dibenzothiophene, yield=55% (1 example)
	Dihydropyridine, yields=81–96% (8 examples)
	Dioxane, yields=78–90% (9 examples)
	Flavone, yields=72–80% (7 examples)
	Isoflavone, yields=71–91% (4 examples)
	Hydantoin, yields=81–94% (6 examples)

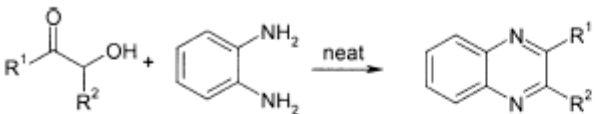
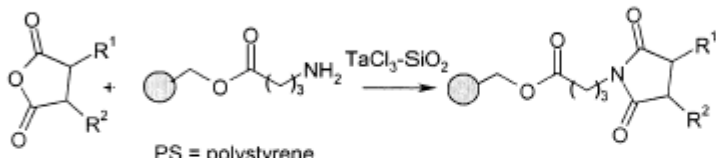
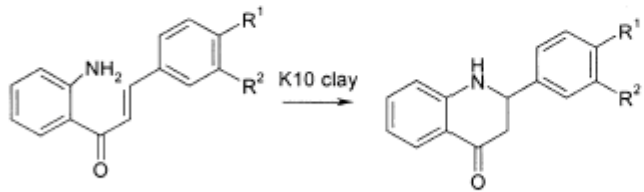
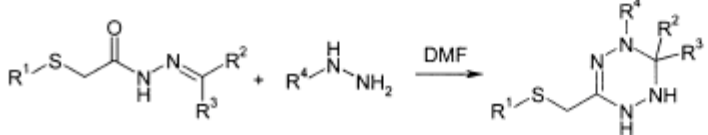
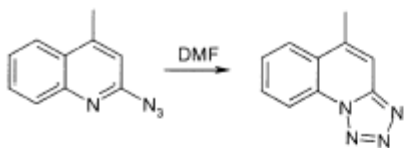
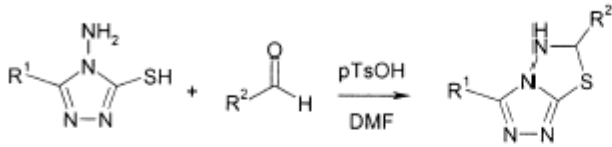
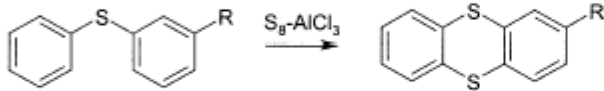
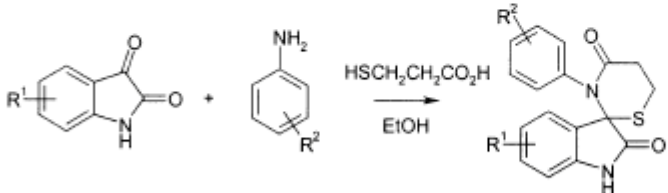
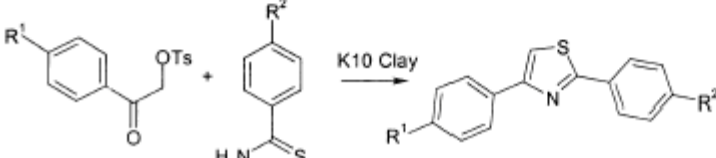
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Imidazole, yields=68–82% (8 examples)
	Imidazolinone, yields=68–82% (8 examples)
	Indole, yield=100% (1 example)
	Indoline, yield=93% (1 example)
	Indolizidine, yields=32–84% (7 examples)
	Isatin, yields=61–85% (5 examples)
	Isoxazole, yields (A)=25–73%, yields (B)=0–22% (8 examples)
	Isoxazole-, capture by dipolarophiles, yields=55–65% (8 examples)
	Isoxazoline, yields=50–90% (11 examples)
	Isoxazoline, yields=63 and 67% (2 examples)
	β-Lactam, yields=83–99% (5 examples)

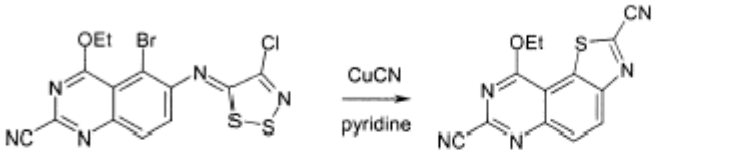
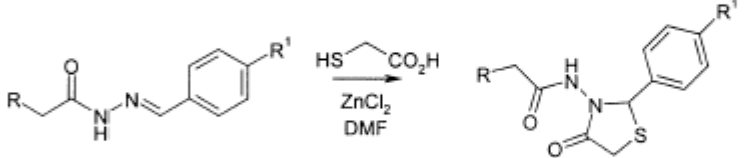
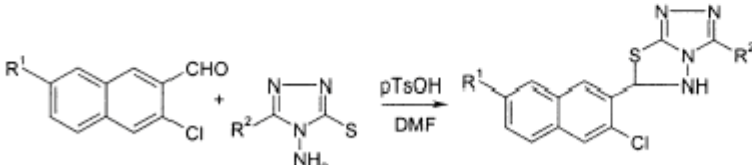
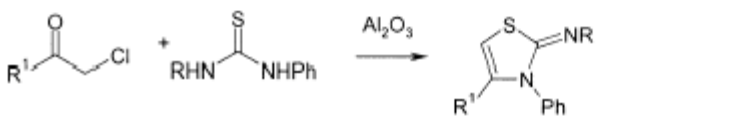
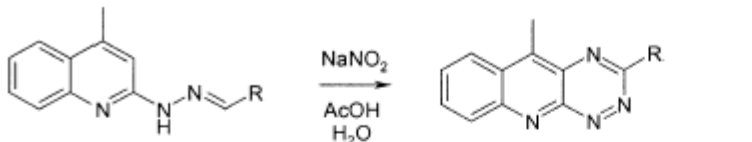
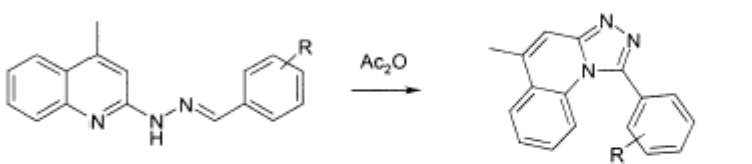
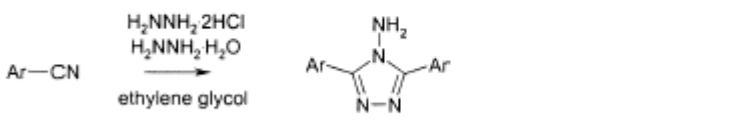
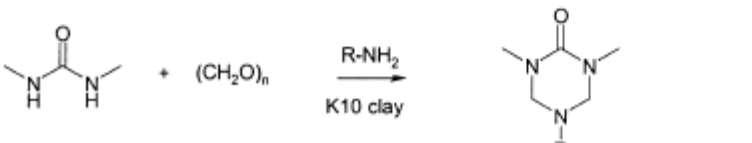
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Lactam, yields=60–86% (6 examples)
	Lactone, yields=60–86% (6 examples)
	Naphthopyran, yields=75–96% (6 examples)
	Oxadiazinone, yield=67% (1 example)
	1,2,4-Oxadiazole, yields=50–95% (9 examples)
	1,3,4-Oxadiazole, yields=68–80% (4 examples)
	1,3,4-Oxadiazole, yields=70–98% (16 examples)
	1,3-Oxazole, yields=72–100% (11 examples)
	Oxazoline, yield=83% (1 example)
	Oxazoline, yields=43–94% (15 examples)
	Oxazolidinone, yields=90–96% (14 examples)
	Phenothiazine, yields=48–94% (4 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Phenoxathiin, yield=85 % (1 example)
	Piperazine, yields=18–51 % (7 examples)
	Pyran, yields=54–87 % (3 examples)
	Pyrazole, yields=67–89 % (10 examples)
	Pyridazine, yields=60–93 % (4 examples)
	Pyridazinedione, yield=84 % (1 example)
	Pyridazinone, yields=97–98 % (4 examples)
	Pyridazinedione, yields=40–87 % (9 examples)
	Pyrazole, yields=75–83 % (4 examples)
	Pyrazoline, yields=73–88 % (11 examples)
	Pyridine, yields=70 % (96 examples)

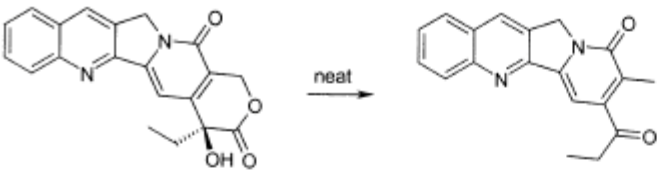
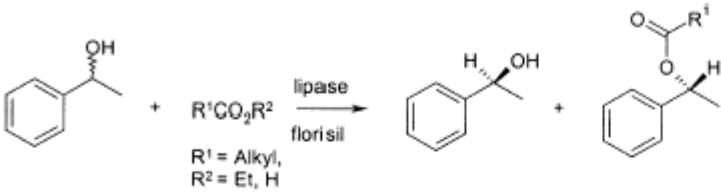
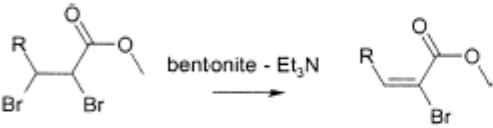
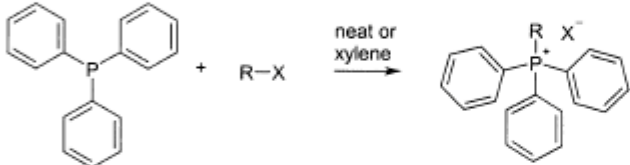
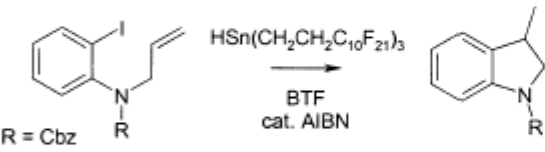
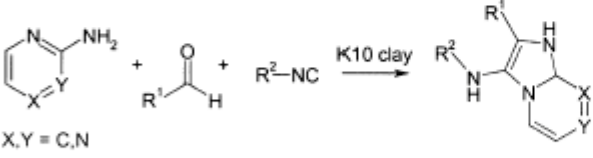
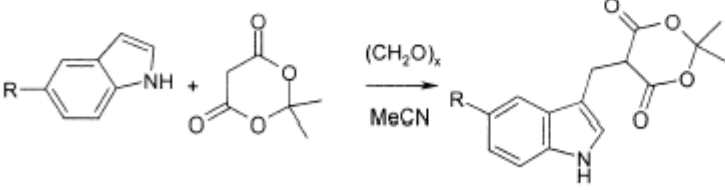
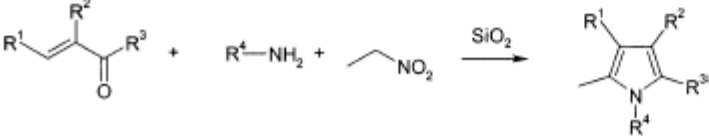
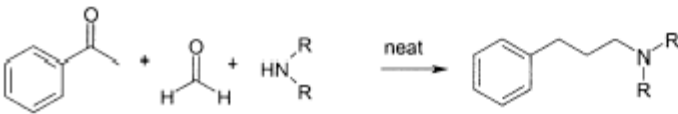
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Pyridines, yields=69–78% (8 examples)
	Pyridine, yields=81–88% (12 examples)
	Pyridine, yields=32–84% (7 examples)
	Pyridinone, yields=quantitative (3 examples)
	Pyrimidine, yield=95% (1 example)
	Pyrimidine, yields=60–92% (5 examples)
X = O, S	Pyrimidinone, yields=65–95% (15 examples)
	Pyrimidinone, yields=80–83% (6 examples)
	Pyrimidinone, yields=52–82% (6 examples)
	Pyrrole, yields=75–90% (8 examples)

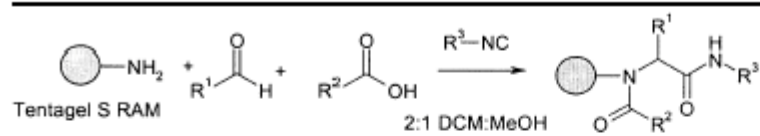
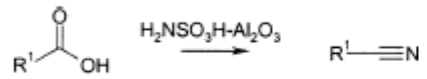
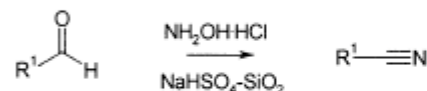
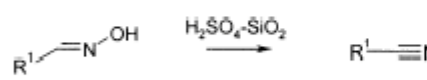
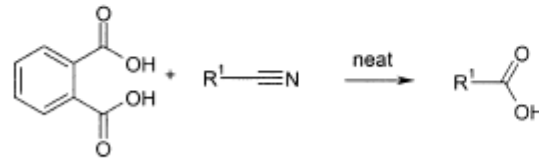
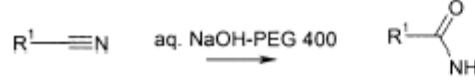
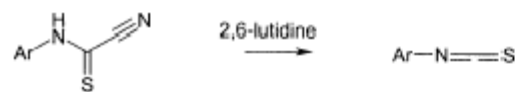
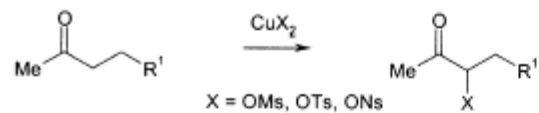
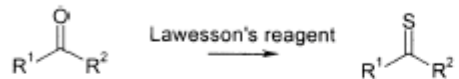
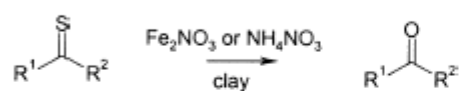
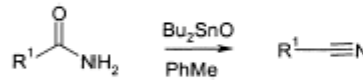
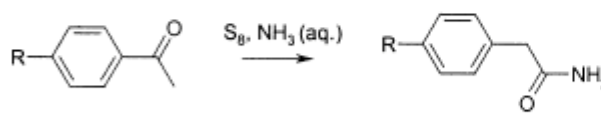
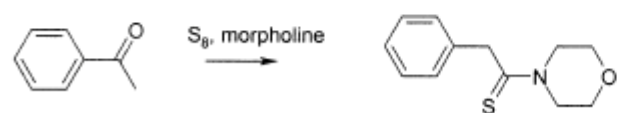
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Pyrrole, yields=60–72% (16 examples)
	Pyrrolidine, yields=15–37% (3 examples)
	Pyrrolidinone, yields=60–87% (3 examples)
	Quinazoline, yields=73–93% (10 examples)
	Quinazolinone, yields=72–89% (9 examples)
	Quinazoline, yield=61% (1 example)
	Quinoline, yields=45–72% (10 examples)
	Quinoline, yields=55–87% (15 examples)
	Quinolone, yield=78% (1 example)
	Quinone, yields=21–92% (5 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
 $R^1-C(=O)-CH(OH)-R^2 + \text{1,2-phenylenediamine} \xrightarrow{\text{neat}} \text{quinoxaline derivative}$	Quinoxaline, yields=20–93% (8 examples)
 $\text{anhydride} + \text{PS-CH}_2\text{CH}_2\text{O-CO-CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2 \xrightarrow{\text{TaCl}_3\text{-SiO}_2} \text{succinimide derivative}$ PS = polystyrene	Succinimide, overall yields=60–65%, after cleavage of acid from resin. (3 examples)
 $\text{2-aminobenzophenone derivative} \xrightarrow{\text{K10 clay}} \text{tetrahydroquinolone derivative}$	Tetrahydro-, quinolone, yields=70–80% (7 examples)
 $\text{thioamide derivative} + \text{hydrazine derivative} \xrightarrow{\text{DMF}} \text{tetrazine derivative}$	Tetrazine, yields=51–65% (10 examples)
 $\text{2-azidoquinoline derivative} \xrightarrow{\text{DMF}} \text{tetrazole derivative}$	Tetrazole, yield=73% (1 example)
 $\text{1,3,4-thiadiazole-5-thiol derivative} + \text{aldehyde} \xrightarrow[\text{DMF}]{\text{pTsOH}} \text{1,3,4-thiadiazole derivative}$	1,3,4-Thiadiazole, yields=70–100% (31 examples)
 $\text{diphenyl sulfide derivative} \xrightarrow{\text{S}_8\text{-AlCl}_3} \text{thianthrene derivative}$	Thianthrene, yield=95% (1 example)
 $\text{cyclic amide derivative} + \text{aniline derivative} \xrightarrow[\text{EtOH}]{\text{HSC}_2\text{H}_4\text{CO}_2\text{H}} \text{thiazinone derivative}$	Thiazinone, yields=62–84% (5 examples)
 $\text{thioamide derivative} + \text{thioamide derivative} \xrightarrow{\text{K10 Clay}} \text{thiazole derivative}$	Thiazole, yields=85–96% (14 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Thiazole, yield=53% (1 example)
	Thiazolidinone, yields= 59–70% (4 examples)
	Thiazolidinone, yields= 59–70% (4 examples)
	Iminothiazoline, yields= 77–98% (12 examples)
	1,2,4-Triazine, yields=68–88% (6 examples)
	1,2,4-Triazole, yields=84–92% (8 examples)
	1,2,4-Triazole, yields=61–97% (4 examples)
	Triazone, yields=71–84% (6 examples)

Micellaneous

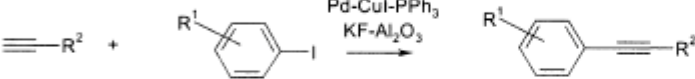
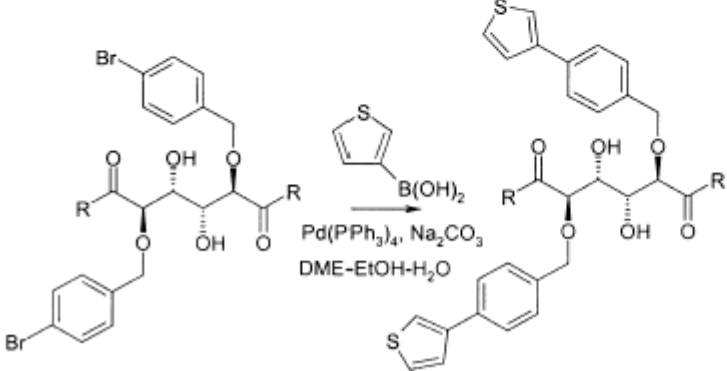
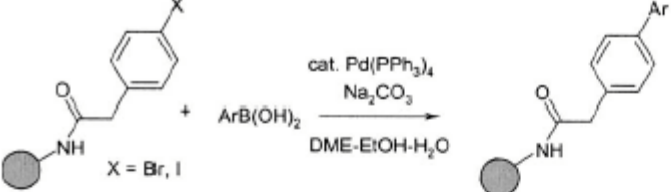
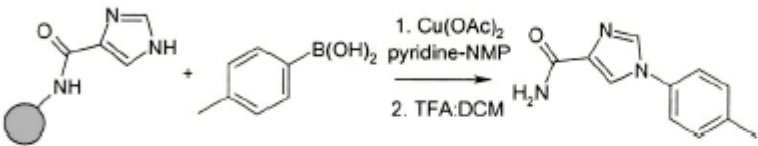
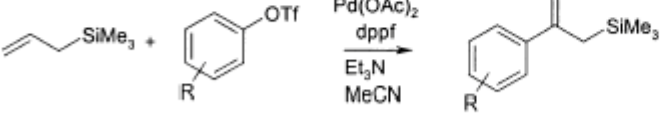
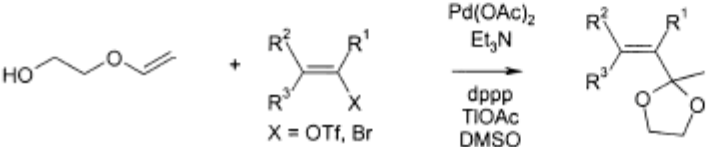
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Decarboxylation, yield=96% (1 example)
 $R^1 = \text{Alkyl}, R^2 = \text{Et, H}$	Enzymatic resolution, yields=36–52% ee=32–100% (5 examples)
	Elimination of HBr, yields=100% E/Z=55/45 (4 examples)
	Phosphonium salt formation, yields=83–99% (7 examples)
 $R = \text{Cbz}$	Radical intramolecular cyclization reaction, yield=93% (1 example)
 $X, Y = \text{C, N}$	Three-component reaction, yields=56–88% (14 examples)
	Three-component reaction, yields=15–63% (5 examples)
	Pyrrole three-component reaction, yields=60–72% (16 examples)
	Mannich three-component reaction, yields=60–83% (12 examples)

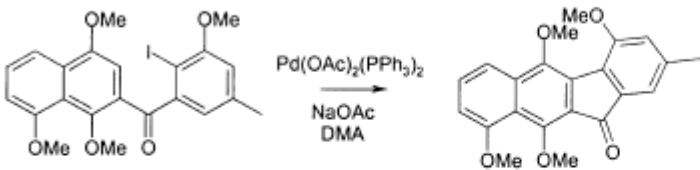
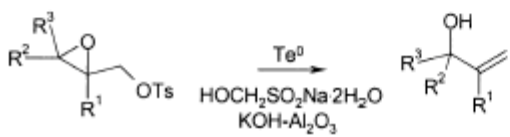
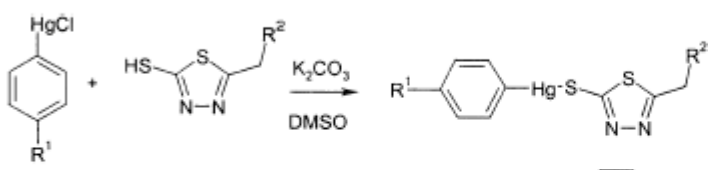
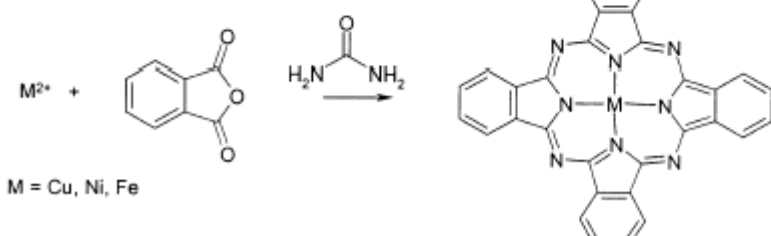
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
 Tentagel S RAM + R^1-CHO + R^2-COOH $\xrightarrow{R^3-NC, 2:1 DCM:MeOH}$ Product	Ugi four-component condensation, yields=24–96% (18 examples)
 $R^1-COOH \xrightarrow{H_2NSO_3H-Al_2O_3} R^1-CN$	Conversion of carboxylic acids to nitriles, yields=20–93% (20 examples)
 $R^1-CHO \xrightarrow{NH_2OH \cdot HCl, NaHSO_4-SiO_2} R^1-CN$	Conversion of aldehydes to nitriles, yields=80–97% (11 examples)
 $R^1-CH=N-OH \xrightarrow{H_2SO_4-SiO_2} R^1-CN$	Conversion of aldoximes to nitriles, yields=64–91% (12 examples)
 Phthalic acid + $R^1-CN \xrightarrow{neat} R^1-COOH$	Conversion of nitriles to carboxylic acids, yields=64–91% (8 examples)
 $R^1-CN \xrightarrow{aq. NaOH-PEG 400} R^1-CONH_2$	Conversion of nitriles to amides, yields=21–91% (14 examples)
 $Ar-NH-C(=S)-CN \xrightarrow{2,6-lutidine} Ar-N=C=S$	Conversion of thioanilides to isothiocyanates, yields=54 and 57% (2 examples)
 $Me-C(=O)-CH_2-CH_2-R^1 \xrightarrow{CuX_2} Me-C(=O)-CH_2-CH_2-CH(X)-R^1$ X = OMs, OTs, ONs	Sulfonyloxylation, yields=55–80% (18 examples)
 $R^1-C(=O)-R^2 \xrightarrow{\text{Lawesson's reagent}} R^1-C(=S)-R^2$	Conversion of carbonyls to thiocarbonyls, yields=76–97% (27 examples)
 $R^1-C(=S)-R^2 \xrightarrow[clay]{Fe_2(NO_3)_3 \text{ or } NH_4NO_3} R^1-C(=O)-R^2$	Conversion of thiocarbonyls to carbonyls, yields=88–95% (8 examples)
 $R^1-C(=O)-NH_2 \xrightarrow{PhMe, Bu_2SnO} R^1-CN$	Conversion of amides to nitriles, yields=80–95% (12 examples)
 $R-C_6H_4-C(=O)Me \xrightarrow{S_8, NH_3(aq.)} R-C_6H_4-CH_2-C(=O)NH_2$	Willgerodt reaction, yields=61–72% (4 examples)
 $Ph-C(=O)Me \xrightarrow{S_8, morpholine} Ph-CH_2-C(=S)-N(CH_2)_4O$	Willgerodt–Kindler reaction, yields=40–81% (8 examples)
 $R^1-CH_2-CH_2-SO_2-R^2 \xrightarrow{NMF} R^1-CH=CH_2$	Dehydro-, sulfenyl-, yields=80–99% (12 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
$R^1-S-C(=O)-R^2 \xrightarrow[\text{clay}]{NH_4NO_3} R^1-S-S-R^1$	Disulfide formation, yields=57–98% (13 examples)
$R-CH_2-Br + Se \xrightarrow[PEG-400]{NaOH} R-CH_2-Se-Se-CH_2-R$	Diselenide formation, yields=72–91% (8 examples)
$Ar-NO_2 \xrightarrow[MeOH]{Bi-KOH} Ar-N=N-Ar$	Azo formation, yields=60–85% (12 examples)
$R^1-NH_2 + R^2 \xrightarrow[KHSO_4]{NaNO_2} R^1-N=N-R^2$	Azo formation, yields=60–100% (6 examples)
$R-CHO + (CH_3)_3Si-CH_2-CN \xrightarrow{\text{cat. piperidine}} R-CH_2-CH_2-CN$	β -Trimethylsiloxy nitriles, yields=38–67% (5 examples)
$R^1-C(=O)-R^2 \xrightarrow[K10 \text{ clay}]{TMSCl} R^1-C(TMSO)(R^2)-C(TMSO)(R^2)-R^2$	Bis-(trimethylsilyl) pinacols, yields=56–90% (8 examples)
$CH_2=CH-CHO \xrightarrow[\text{hydroquinone}]{PhH} \text{dimer}$	Dimerization, yield=91% (1 example)
$\text{Indole} \xrightarrow[AcOH-H_2O]{Cu(NO_3)_2} \text{5-nitroindole}$	Nitration, yields=50–92% (6 examples)
$R-Ph \xrightarrow[H_2SO_4]{HNO_3} R-Ph-NO_2$	Nitration, yields=57–89% (6 examples)

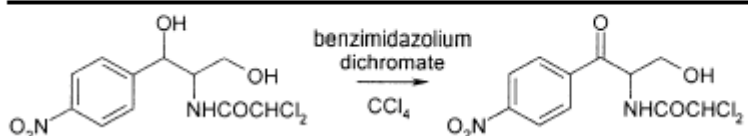
Organometallic reactions

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
$Ph-I + EtO_2C-C\equiv C-CO_2Et \xrightarrow[\text{cat. Pd(OAc)}_2, CuO, DMF-BTF]{HSn(CH_2CH_2C_{10}F_{21})_3, \text{cat. AIBN}} EtO_2C-CH=CH-CO_2Et$	Hydrostannylation and vinylic Stille coupling <i>E/Z</i> =5:1, yield=77% (1 example)

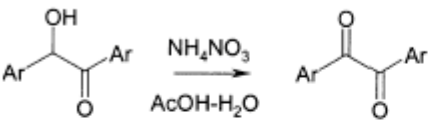
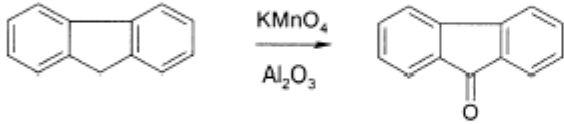
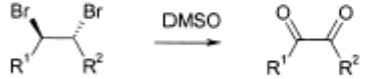
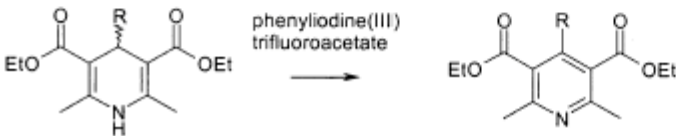
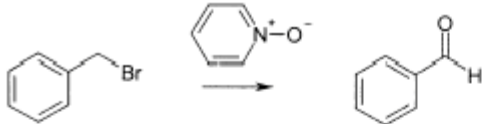
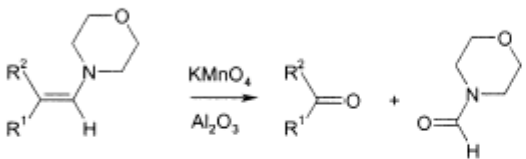
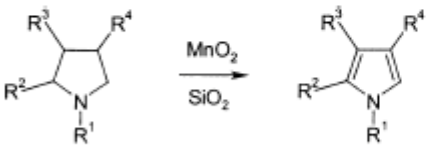
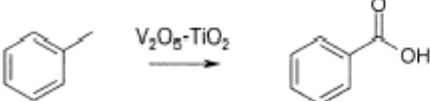
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
 $\text{X} = \text{Br}, \text{I}, \text{OTf}$	Stille coupling, yields=49–96% (16 examples)
	Sonogashira coupling, yields=67–97% (12 examples)
	Suzuki coupling, yields=38–96% (9 examples)
 $\text{X} = \text{Br}, \text{I}$	Suzuki coupling, yields=84–99%, after cleavage of amide from resin (14 examples)
	Copper-mediated C–N cross coupling, yields=55–64% (4 examples)
	Heck reaction, yields=25–89% (6 examples)
	Internal Heck reaction, yields=28–69% (8 examples)
 $\text{X} = \text{OTf}, \text{Br}$	Heck vinylation, yields=45–89% (8 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Intramolecular Heck reaction, yield=53% (1 example)
	Asymmetric alkylation, yields=96 and 99% ee=65–85% (2 examples)
	Nucleophilic reduction, yields=50 and 83% (2 examples)
$M(CO)_6 \xrightarrow[\text{diglyme}]{L} ML(CO)_4$ L = bipy, en, dppm or dppe	Cyclometallation, yields=55–99% (12 examples)
	Organomercurials, yields=68–88% (12 examples)
 M = Cu, Ni, Fe	Metallophthalocyanines, yields=86–91% (4 examples)

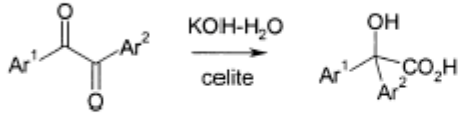
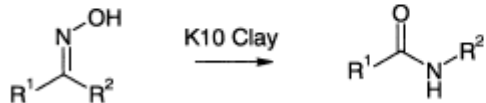
Oxidation

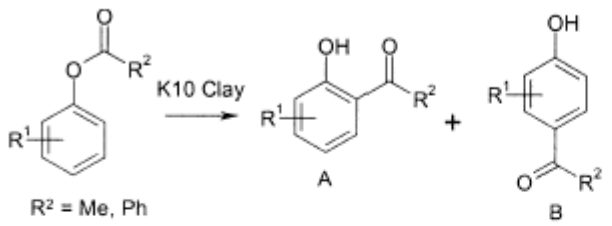
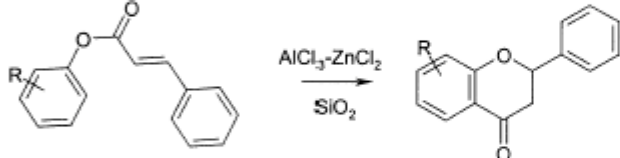
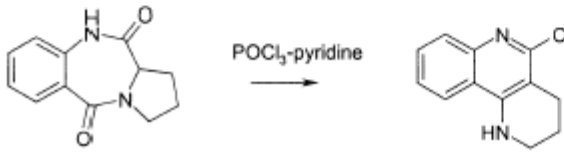
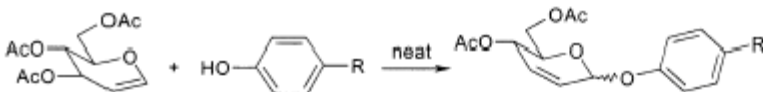
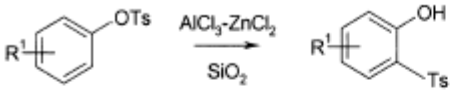
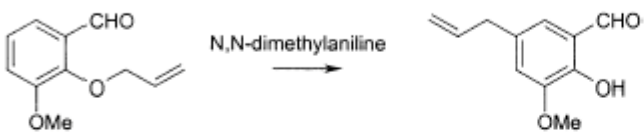
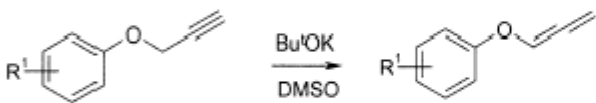
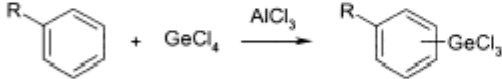
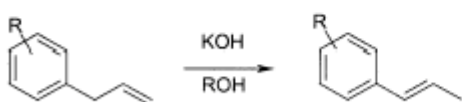
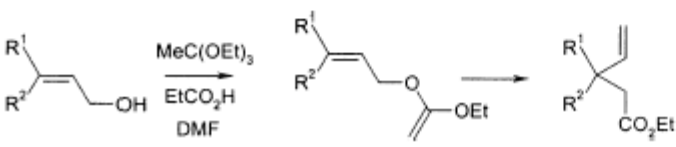
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Oxidation of benzylic and allylic alcohols, yields=73–97% (12 examples)

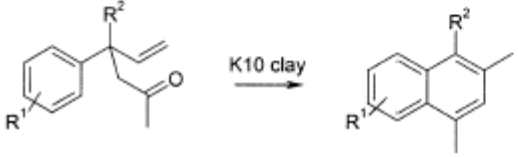
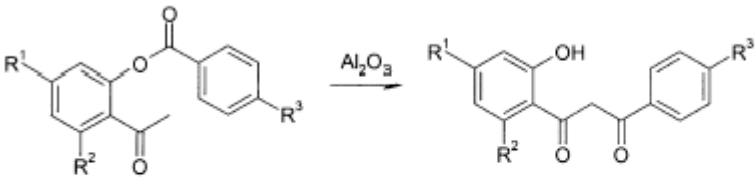
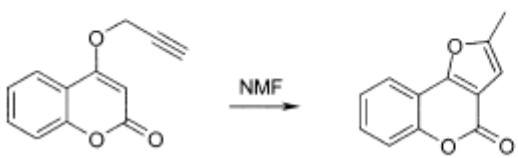
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
$\begin{array}{ccc} \text{R}^1\text{CH(OH)R}^2 & \xrightarrow[\text{DCM}]{\text{PCC}} & \text{R}^1\text{C(=O)R}^2 \end{array}$	Oxidation of primary and secondary alcohols, yields=70–99% (14 examples)
$\text{R}^1\text{CH(OH)R}^2 \xrightarrow{\text{Clayfen}} \text{R}^1\text{C(=O)R}^2$	Oxidation of primary and secondary alcohols, yields=87–96% (8 examples)
$\text{R}^1\text{CH(OH)R}^2 \xrightarrow[\text{molecular sieves}]{\text{Bu}^t\text{O}_2\text{H, CCl}_4} \text{R}^1\text{C(=O)R}^2$	Oxidation of secondary and benzylic alcohols, yields=18–97% (7 examples)
$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{OH} \xrightarrow[\text{diethyl ether}]{\text{MnO}_2} \text{C}_6\text{H}_5\text{CHO}$	Oxidation, yields=52–82% (3 examples)
$\text{HO-C}_6\text{H}_3(\text{OH})\text{R} \xrightarrow[\text{bentonite}]{\text{MnO}_2} \text{O=C}_6\text{H}_3(\text{O})\text{R}$	Oxidation, yields=30–100% (5 examples)
$\text{R}^1\text{CH(R}^2\text{)O(CH}_2\text{)}_5\text{CH}_2\text{OCH(R}^2\text{)R}^1 \xrightarrow[\text{K10 clay}]{\text{bis(trimethylsilyl)chromate}} \text{R}^1\text{C(=O)R}^2$	Oxidative deprotection, yields=75–92% (10 examples)
$\text{R}^1\text{CH}_2\text{OH} \xrightarrow[30\% \text{ aq. H}_2\text{O}_2]{\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O, TBAHS}} \text{R}^1\text{COOH}$	Oxidation of primary alcohols, yield=60–84% (4 examples)
$\text{Cyclohexanone-2-ol} \xrightarrow{\text{NaOCl}} \text{HO(CH}_2\text{)}_4\text{COOH}$	Oxidation of α -substituted carbonyl groups, yields=65–92% (9 examples)
$\text{Cyclohexene oxide} \xrightarrow[\text{KSF clay}]{\text{DMSO}} \text{Cyclohexanone-2-ol}$	Oxidation of epoxides, yields=55–90% (6 examples)
$\text{R}^1\text{CH(R}^2\text{)NHC(=O)NH}_2 \xrightarrow[\text{K10 clay}]{\text{bis(trimethylsilyl)chromate}} \text{R}^1\text{C(=O)R}^2$	Oxidative deprotection, yields=62–96% (11 examples)
$\text{R}^1\text{CH(R}^2\text{)C(R}^3\text{)=C(R}^4\text{)CO}_2\text{R}^5 \xrightarrow[\text{H}_2\text{O-dioxane}]{\text{NaBO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}} \text{R}^1\text{CH(R}^2\text{)C(R}^3\text{)C(R}^4\text{)CO}_2\text{R}^5$	Epoxidation, yields=73–93% (6 examples)
$\text{R-CH}_2\text{CH=CH-CH}_3 \xrightarrow[\text{SiO}_2]{\text{SeO}_2, \text{Bu}^t\text{O}_2\text{H}} \text{R-CH}_2\text{CH=CH-CHO}$	Oxidation of allylic methyl groups, yields=68–85% (6 examples)
$\text{C}_6\text{H}_5\text{CHO} \xrightarrow[\text{neat}]{\text{air}} \text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}$	Oxidation of aromatic aldehydes, yields=58–81% (12 examples)
$\text{R}^1\text{S(=O)R}^2 \xrightarrow[\text{SiO}_2]{1.7 \text{ eq NaIO}_4} \text{R}^1\text{S-R}^2 \xrightarrow[\text{SiO}_2]{3 \text{ eq NaIO}_4} \text{R}^1\text{S(=O)}_2\text{R}^2$	Oxidation of sulfides, yields=72–93% (16 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Oxidation of hydroxyketones, yields=78–94% (15 examples)
	Oxidation of arenes, yields=70–100% (5 examples)
	Oxidation of 1,2-dibromides, yields=51–75% (8 examples)
	Oxidation of 1,4-dihydropyridines, yields=68–90% (9 examples)
	Oxidation of benzylic bromides to aldehydes, yields=15–92% (6 examples)
	Oxidative cleavage of substituted enamines, yields=11–83% (3 examples)
	Dehydrogenation of pyrrolidines, yields=58–96% (10 examples)
	Oxidation of toluene, yield=51% (1 example)

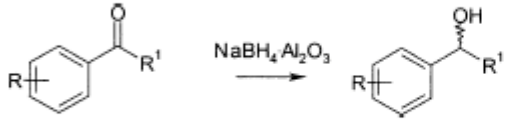
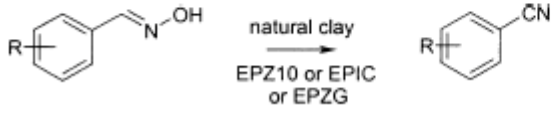
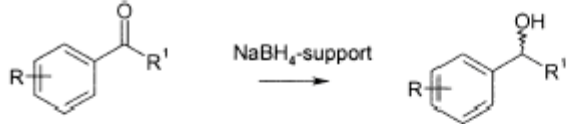
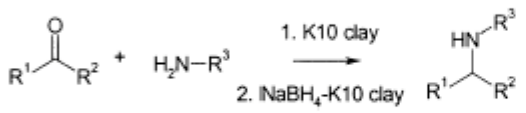
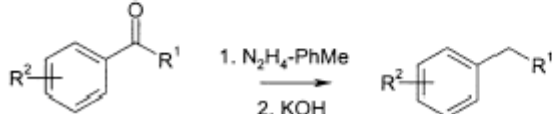
Rearrangement

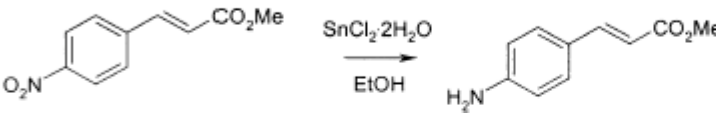
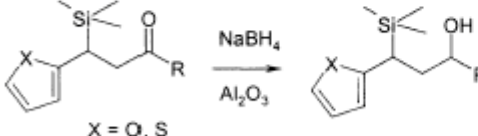
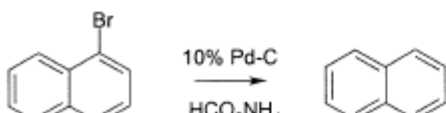
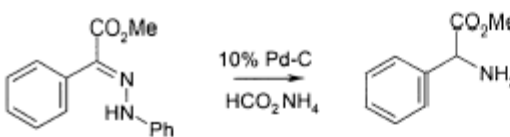
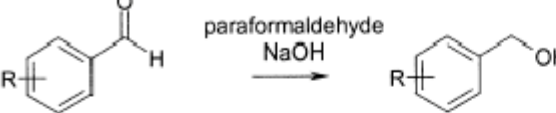
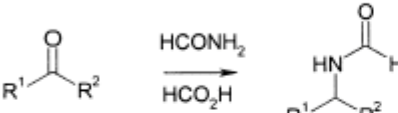
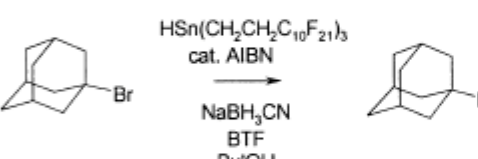
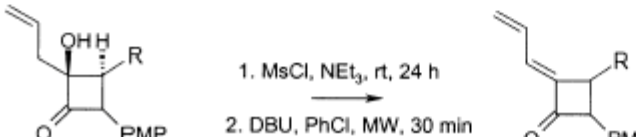
Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Benzil-benzilic acid rearrangement, yields=56–98% (5 examples)
 R¹ = Me, Ph, Cycloalkyl R² = Ar, Cycloalkyl	Beckmann rearrangement, yields=21–96% (6 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
 $R^2 = \text{Me, Ph}$ A B	Fries rearrangement Mixture of <i>ortho</i> -(A) and <i>para</i> -(B) products. A usually major product, yields=50–97% (13 examples)
	Fries rearrangement, yields=73–87% (4 examples)
	Rearrangement of <i>O</i> -aryl <i>N,N</i> -dimethyl-thiocarbamates, yields=30–90% (5 examples)
	Rearrangement of benzodiazepine-diones, yields=28–53% (6 examples)
	Ferrier rearrangement, yields=72–83% (7 examples)
	Thia-Fries rearrangement of arylsulfonates, yields=67–92% (8 examples)
	Rearrangement, yield=65% (1 example)
	Isomerisation of propargyl ethers into allenyl ethers, yields=74–92% (10 examples)
	Syntheses of alkyl- or aryl-halogermanes, yields=80–95% (5 examples)
	Isomerization of safrole and eugenol, yields=98 and 99% (2 examples)
	Ortho ester Claisen rearrangement, yields=60–92% (11 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Thermal rearrangement with the use of florasil, yield=93% (1 example)
	Thermal rearrangement, yields=45–69% (9 examples)
	Rearrangement of <i>o</i> -aryloxyceto-phenones, yields=50–66% (4 examples)
	Rearrangement of hydroxy coumarin propargyl ethers, yields=62–82% (8 examples)

Reduction

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Reduction of aldehydes and ketones, yields=62–93% (9 examples)
	Reduction of aldoximes to nitriles, yields=52–95% (21 examples)
	Reduction of ketones, yields=81–98% (10 examples)
	Reductive amination, yields=78–97% (24 examples)
	Wolff-Kishner reduction, yields=75–97% (12 examples)

Conditions	Type of reaction/yields/number of examples
	Allyl reduction, yields~80% (5 examples)
	Reduction of nitrogroups, yields=55–99% (8 examples)
	Reduction of unsaturated esters, yields=80 and 90% (2 examples)
 X = O, S	Reduction of β -trimethylsilyl carbonyls, yields=60–100% (6 examples)
	Dehalogenation, no yields quoted (10 examples)
	Imine reduction, yield=90% (1 example)
	Cross-Cannizzaro reaction, yields=85–95% (11 examples)
	Leuckart reductive amination, yields=91–99% (5 examples)
	Radical reduction reaction, yield=81% (1 example)
	Dehydration, yield=68% (1 example)
	Dehydration, yields=79–96% (4 examples)

บทที่ 2

เนื้อหางานวิจัย

2.1 เครื่องทำปฏิกิริยาเคมีโดยรังสีไมโครเวฟ (OCRMJ Domestic Microwave Reactor)

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้น ไมโครเวฟ เป็นเทคโนโลยีที่กำลังถูกนำมาใช้ เนื่องจากทำให้การใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า แต่ให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูง

ปัจจุบัน งานวิจัยด้านนี้กำลังมีมากขึ้น เนื่องจากมีเครื่องทำปฏิกิริยาเคมีด้วยไมโครเวฟออกจำหน่ายทั่วไป ทั้งที่ควบคุมโดยใช้ปุ่มควบคุม และควบคุมอัตโนมัติ โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งมีราคาแพง (รูปที่ 2.1) ในการวิจัยนี้ ได้พัฒนาเครื่องไมโครเวฟบ้าน มาเป็นเครื่องทำปฏิกิริยาเคมีด้วยไมโครเวฟ ควบคุมการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเอง ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microwave Reactor Control Software via Micro Controllers) โดยใช้ภาษา Visual Basic Version 6 ในการพัฒนาโปรแกรม



รูปที่ 2.1 Commercial Microwave Reactor

การนำเตาอบไมโครเวฟมาใช้ในการสังเคราะห์สาร จะทำการดัดแปลงเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนทั่วไป ซึ่งความถี่ 2.45 GHz โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง และมีพลังงานสูงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูง และได้ดัดแปลงเพื่อให้สามารถทำปฏิกิริยาโดยวิธี Reflux ภายใต้สภาวะไนโตรเจนได้

2.1.1 รายการอุปกรณ์

เครื่องไมโครเวฟ (Sumsung, M1932)

Electric Stirrer (Any band)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ชุดติดต่อ RS-232, ICL232)

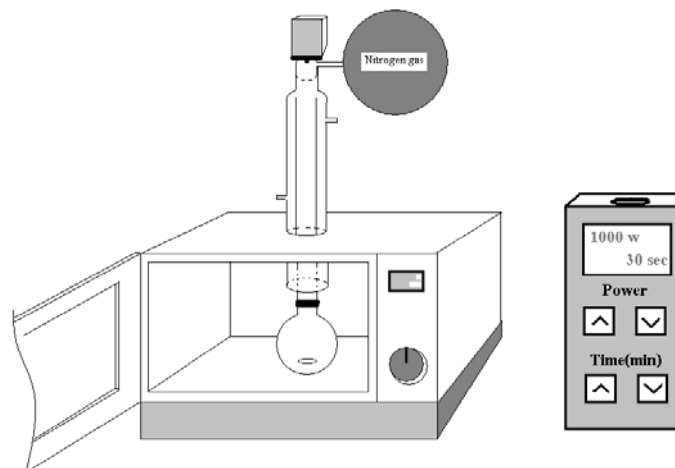
คอมพิวเตอร์ (PIII 500 MHz, Ram64, Window 98 up)

2.1.2 การทำตัว Reactor

ได้ดัดแปลงเตาอบไมโครเวฟ Sumsung M1932 โดยดัดแปลงเอาจานหมุนแก้วที่รองอาหารออก เอาพื้นโลหะ และระบบมอเตอร์ของจานหมุนออก และใช้อลูมิเนียมมาแทนพื้นโลหะ เชื่อมติดกันด้วยกาว Elastomer ทนไฟ สาเหตุที่ใช้แผ่น อลูมิเนียมแทน เพราะต้องการให้ Magnetic Stirrer และ Magnetic bar ใน Reaction Flask หมุนได้ เนื่องจากหากพื้นเป็นโลหะ Magnetic Bar จะไม่ขยับเลย

ได้เครื่องไมโครเวฟจะสร้างกล่องควบคุม และติดตั้ง Electric Stirrer โดยแผงควบคุมถูกย้ายมารวมกันด้านหน้า และสร้าง Port (RS232) เพื่อต่อสัญญาณกับตัว Remote control เพื่อควบคุมระยะไกลได้ นอกจากนี้ ได้รวมวงจรควบคุม ต่อเข้ากับกล่อง Micro controller ควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ ผ่าน Port RS233

ด้านบนของเครื่อง Microwave Reactor ได้เจาะรู เพื่อใส่ Condenser ซึ่งออกแบบมาพิเศษ ให้สามารถต่อได้พอดีกับ Reaction Flask ภายในเตาไมโครเวฟ ด้านบนจะติดตั้ง Infrared Thermometer ส่องตรงมาที่ก้น Reaction Flask เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิในระหว่างเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 OCRMJ Domestic Microwave Reactor®

2.1.3 การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Visual Basic 6

นอกจากนี้ ได้พัฒนา Soft ware ควบคุมเครื่อง Microwave Reactor นี้ โดยใช้โปรแกรม ภาษา Visual Basic 6 ซึ่งเขียนโปรแกรมควบคุมผ่าน Micro Controller โดยใช้หลักการดังนี้

โปรแกรมภาษา Visual Basic เป็นโปรแกรมที่ใช้สร้างโปรแกรมประยุกต์ สำหรับระบบ ปฏิบัติการ Windows โดย Visual เป็นส่วนที่หมายถึงเมธอดในการติดต่อแบบ graphical user interface (GUI) ซึ่งการสร้างทำได้โดยการเพิ่มอ็อบเจค ลงบนฟอร์มที่ทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้ผ่าน จอภาพ ส่วน Basic เป็นส่วนที่หมายถึงภาษา BASIC (Beginners ALL Purpose Symbolic Instruction Code) โดย Visual Basic ได้เปลี่ยนแปลงจากภาษา BASIC ดั้งเดิม ด้วยการเพิ่ม ประโยคคำสั่ง ฟังก์ชัน และคีย์เวิร์ด ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับ GUI

แนวคิดของ Visual Basic เป็นโปรแกรมประยุกต์ Visual Basic เป็นการพัฒนาในสภาพแวดล้อมของ windows ซึ่ง แนวคิดพื้นฐานในการทำงานของระบบ Windows ที่สำคัญมี 3 ประการ คือ Window, Events และ ข่าวสาร (Message)

โปรแกรมประยุกต์ Visual Basic มีการทำงานแบบ Event-Driven ที่เป็นการประมวลผลตามคำสั่งในแต่ละส่วนเพื่อตอบสนองต่อ Event ซึ่ง Event เหล่านี้สามารถเปลี่ยนโดยการทำงานของผู้ใช้ ข่าวสารของระบบหรือโปรแกรมประยุกต์อื่น หรือภายในโปรแกรมเดียวกัน ลำดับการทำงานของ Event จะจัดลำดับโดยจากการประมวลคำสั่ง

การสร้างโปรแกรมประยุกต์ Visual Basic ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ

- การสร้างอินเทอร์เฟซ โดยมีฟอร์มเป็นอ็อบเจกต์พื้นฐานและเป็นที่วางตัว Control สำหรับการติดต่อกับผู้ใช้
- ตั้งค่าคุณสมบัติ เป็นการกำหนดพฤติกรรมและการทำงานให้กับอ็อบเจกต์ต่าง ๆ
- การเขียนคำสั่ง เป็นการควบคุมการประมวลผลผ่าน procedure ที่กำหนด เช่น

```
Private Sub Form_Load()
    Text1.Text = "Hello Word"
End Sub
```

โครงสร้างของ Project ที่สร้างขึ้น สามารถประกอบด้วยไฟล์และอ็อบเจกต์ ดังนี้

- Form Modules (.frm) สามารถเก็บข้อความของฟอร์ม ตัว control ที่มีการกำหนดค่าคุณสมบัติ และเก็บระดับการประกาศค่าระดับฟอร์มของค่าคงที่, ตัวแปร และ procedure ภายนอก, event procedure และ procedure ทั่วไป
- Class Modules (.cls) คล้ายกับ form module แต่แตกต่างที่จะไม่มีการรบกวนจากผู้ใช้ทั่วไป ใน class module สามารถสร้างอ็อบเจกต์ของผู้พัฒนาโปรแกรมรวมถึงคำสั่งเมธอด และคุณสมบัติ
- Standard Modules (.bas) สามารถเก็บการประกาศค่า public และระดับโมดูล ของค่าคงที่ประเภทตัวแปร Procedure ภายนอก และ Public Procedure
- Resource File (.res) เก็บไฟล์บิตแม็บ, ข้อความ และข้อมูลอื่นที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ต้องแก้ไขคำสั่ง เช่น ผู้พัฒนาโปรแกรมวางแผนการสร้างโปรแกรมประยุกต์เป็นภาษาอื่น จะสามารถเก็บข้อความที่ติดต่อกับผู้ใช้ และไฟล์บิตแม็บใน resource file แต่ project สามารถมี resource file เพียง 1 ไฟล์ต่อ project

- ActiveX Documents (.dob) คล้ายกับฟอร์ม แสดงด้วย internet browser โดย Visual Basic ชุด Professional และ Enterprise สามารถสร้าง ActiveX document
- User Control และ Property Page Modules โดย user control (.ctl) และ property page (.pag) เป็นโมดูลที่คล้ายกับฟอร์ม แต่ใช้ในการสร้างตัว control ประเภท ActiveX และ property page ที่ใช้งานร่วมกัน สำหรับการแสดงคุณสมบัติของการออกแบบ Visual Basic ชุด Professional และ Enterprise สามารถสร้าง ActiveX control ได้

หมายเหตุ ;

Components หมายถึงไฟล์ หรือโมดูลที่เพิ่มเข้าไปใน project ซึ่ง components หลายประเภทที่สามารถเพิ่มเข้าไปใน project

ActiveX Control (.ocx) เป็นตัว Control เพิ่มเติมที่สามารถเพิ่มเข้าไปใน Toolbox และ ฟอร์ม เมื่อมีการติดตั้ง Visual Basic ไฟล์ที่เก็บตัว Control ของ Visual Basic จะได้รับการคัดลอกไปยังไดเรกทอรีร่วม (Windows/System) นอกจากนี้ตัว Control ประเภท ActiveX มีแหล่งที่กว้างขวาง และผู้พัฒนาโปรแกรมสามารถสร้างตัว Control ของตัวเองได้ในชุด Professional และ Enterprise

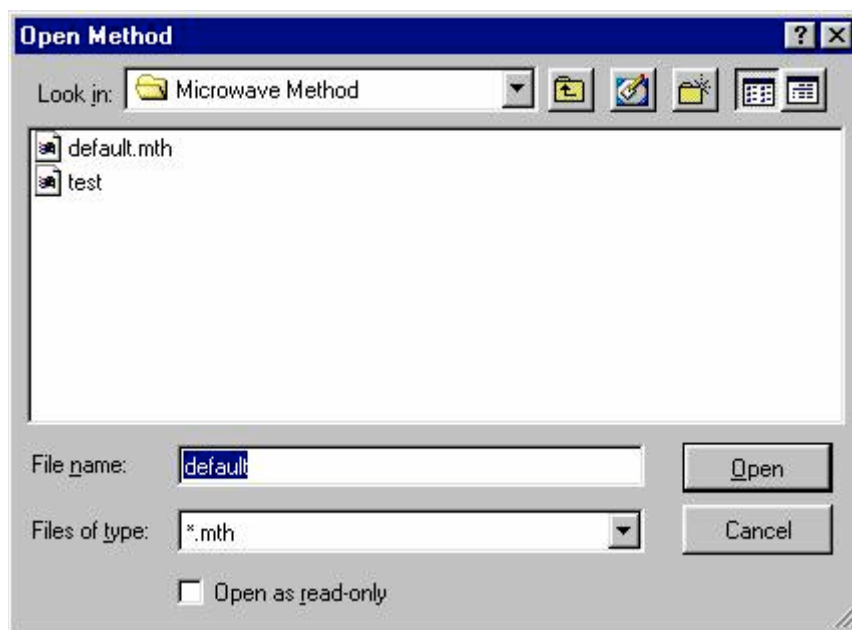
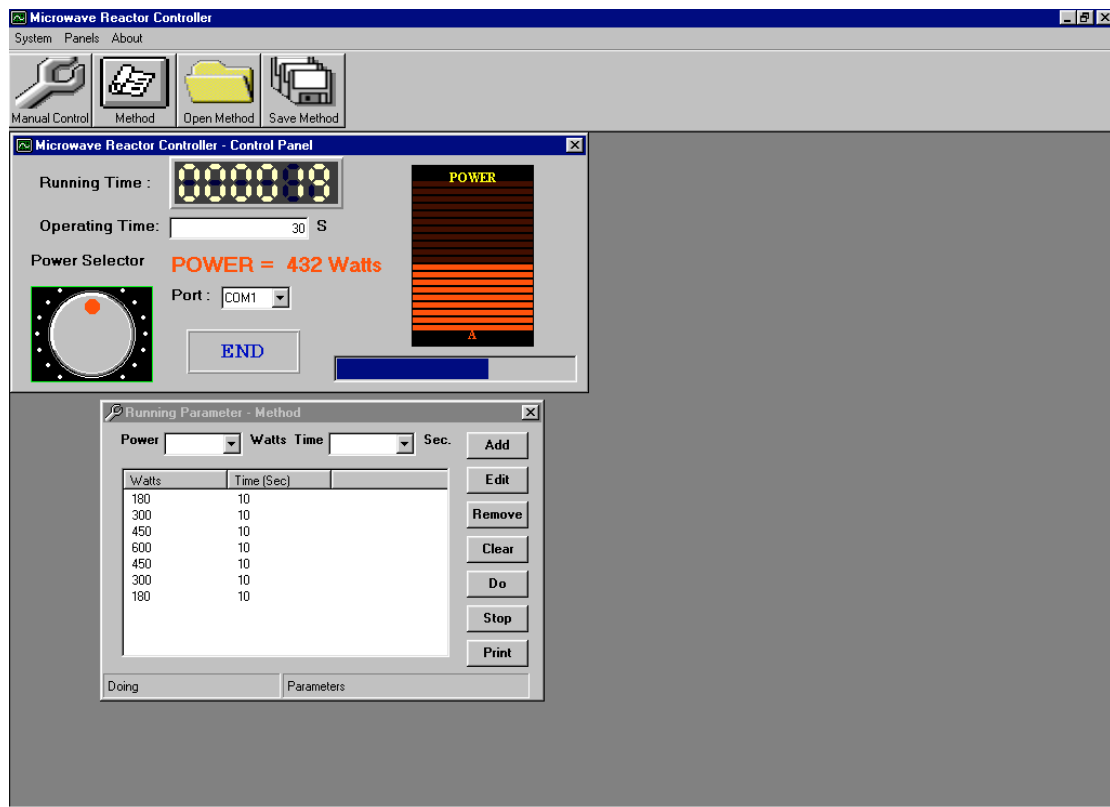
Insertable Objects หมายถึง Component เช่น ไฟล์ Excel ที่สามารถสร้างขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมในรูปแบบ Integrated Solutions โดยรูปแบบนี้สามารถเก็บข้อมูลที่มีฟอร์แมตที่แตกต่างกัน เช่น ไฟล์กระดาษทำการ (เช่น Excel) บิตแม็บ และข้อความ ซึ่งมาจากโปรแกรมประยุกต์ที่แตกต่างกัน

References เป็นการเพิ่มตัว Control ประเภท ActiveX ภายนอก มาใช้ในโปรแกรมประยุกต์ การอ้างถึงทำได้โดยดูล็อกของ Reference ซึ่งเข้าถึงด้วย เมนู Reference ในเมนู Project

ActiveX Designer เป็นเครื่องมือในการออกแบบ Class ที่ต้องการอธิบายเจต โดยการออกแบบการติดต่อสำหรับฟอร์มที่เป็น Designer เริ่มต้น ส่วน Designer เพิ่มเติมมีให้จากแหล่งอื่น

Standard Control เป็นตัว Control มาตรฐานที่ Visual Basic มีไว้ให้เช่น ปุ่มคำสั่ง Combo box โดยจะอยู่ใน Toolbox

ในการทดลองนี้ ได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นเอง โดยมีหน้าต่างของโปรแกรกดัง **รูปที่ 2.3** และมี Code ของภาษาดังนี้



รูปที่ 2.3 OCRMJ Domestic Microwave Reactor Soft Ware ®

Program Code ของภาษา Visual Basic ที่ใช้ในการทดลองนี้

Main

```
Dim Mlist As ListItem
```

```
Private Sub AboutApp_Click()
```

```
frmAbout.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub ControlMenu_Click()
```

```
Manual_Panel.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub MehodMenu_Click()
```

```
FrmMethod.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub ShutDownMenu_Click()
```

```
If Manual_Panel.MSComm1.PortOpen = False Then Manual_Panel.MSComm1.PortOpen  
= True
```

```
Manual_Panel.MSComm1.Output = "PU;"
```

```
Manual_Panel.MSComm1.PortOpen = False
```

```
End
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Toolbar1_ButtonClick(ByVal Button As MSComctlLib.Button)
```

```
On Error GoTo errdet:
```

```
Select Case Button
```

```
Case "Manual Control"
```

Manual_Panel.Show

Case "Method"

FrmMethod.Show

Case "Open Method"

CMD1.DialogTitle = "Open Method"

CMD1.ShowOpen

Open CMD1.FileName For Random As #1 Len = Len(Mrec)

FrmMethod.ListView1.ListItems.Clear

For i = 1 To LOF(1) / Len(Mrec)

Get #1, i, Mrec

Set Mlist = FrmMethod.ListView1.ListItems.Add(, , Str(Mrec.Watts))

With Mlist

.SubItems(1) = Str(Mrec.Timing)

End With

Next

Close #1

Case "Save Method"

CMD1.DialogTitle = "Save Method"

CMD1.ShowSave

Open CMD1.FileName For Random As #1 Len = Len(Mrec)

For i = 1 To FrmMethod.ListView1.ListItems.Count

Mrec.Watts = Val(FrmMethod.ListView1.ListItems(i).Text)

Mrec.Timing = Val(FrmMethod.ListView1.ListItems(i).SubItems(1))