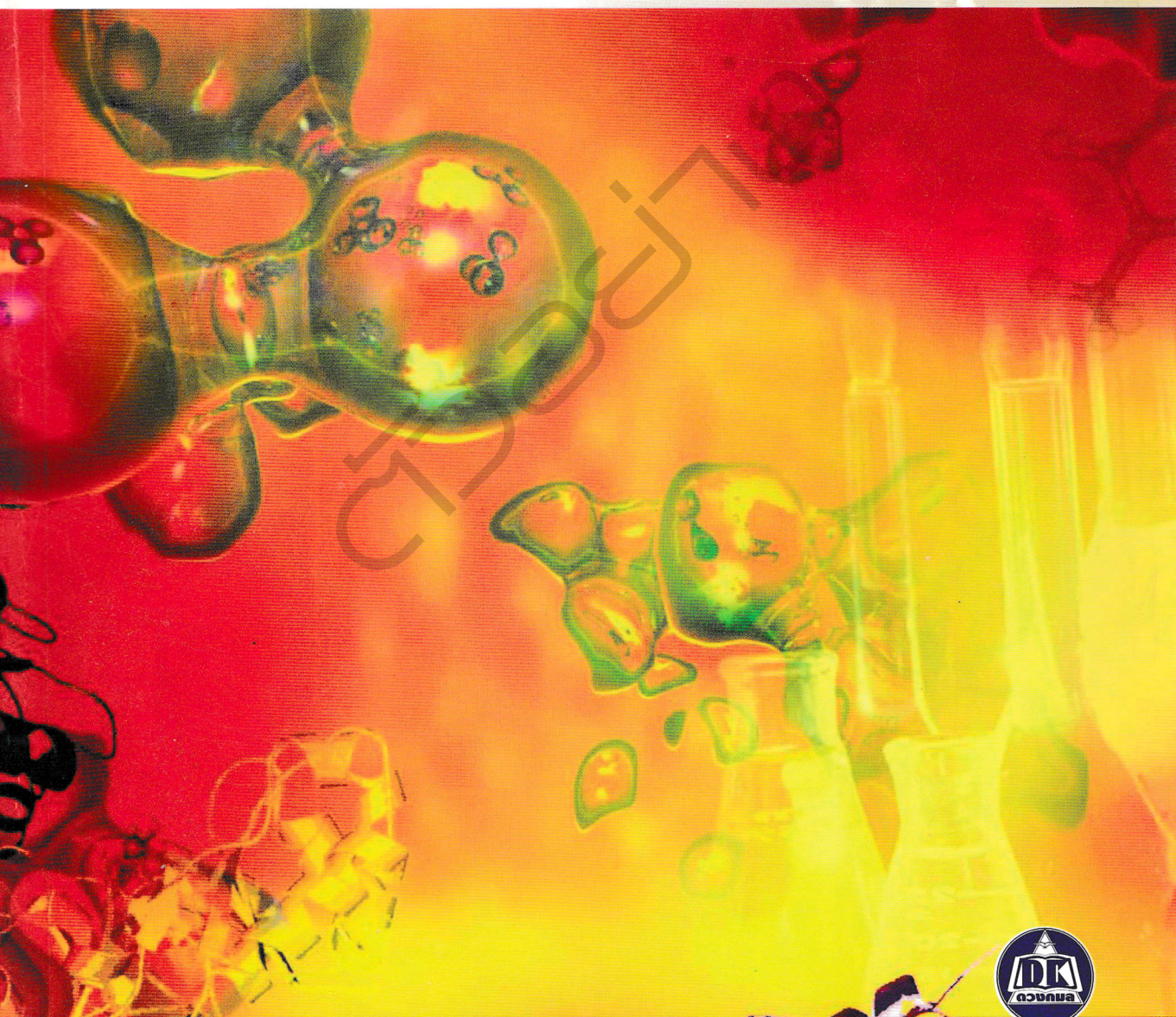


เคมีอินทรีย์ขั้นต้น 1

รองศาสตราจารย์ ดร.วิลาศ พุ่มพิมล



คู่มือการเรียนการสอนวิชาเคมีอินทรีย์เบื้องต้น

ดอกรัง
สำนักพิมพ์ลิขสิทธิ์
ทำเนียบหนังสือดี มีคุณค่า

เคมีอินทรีย์ขั้นต้น 1

รองศาสตราจารย์ ดร. วิลาศ พุ่มพิมล

กศ.บ. (เคมี)

คม. (การศึกษาวิทยาศาสตร์-เคมี)

ปร.ด. (อินทรีย์เคมี)

คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

หนังสือเคมีอินทรีย์ขั้นต้น 1 เป็นหนังสือใช้ประกอบการเรียน การสอนระดับอนุปริญญา และปริญญาตรี ในสถาบันต่างๆ สามารถนำไปเป็นคู่มือประกอบการเรียน การสอน รายละเอียดปลีกย่อย อ่านง่าย เข้าใจง่าย เนื้อหาครอบคลุมอธิบายรายละเอียดได้เข้าใจเป็นอย่างดี สะดวกแก่การอ่าน และทำความเข้าใจ เหมาะสำหรับผู้เรียนและผู้สอน เพื่อจะได้นำไปใช้ประโยชน์แก่ตนเอง และนำไปเผยแพร่ให้ผู้ที่ยังไม่รู้ให้ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

สถาบันการศึกษาต่างๆ ยังเหมาะนำไปให้นักเรียน นักศึกษา ค้นคว้า และเหมาะกับห้องสมุด สำหรับใช้อ้างอิงได้

ด้วยความปรารถนาดี
สำนักพิมพ์ดวงกมลพับลิชชิ่ง

คำนำ

เคมีอินทรีย์เป็นสาขาที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสารประกอบของคาร์บอน หรือที่เรียกว่า สารประกอบอินทรีย์ การศึกษาสารประกอบอินทรีย์มีประเด็นที่สำคัญ คือ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี การพิสูจน์โครงสร้างทางเคมี ตลอดจนการศึกษาค้นคว้าเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ เป็นต้น ผลดังกล่าวทำให้เกิดวิทยาการใหม่ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเคมีอินทรีย์หลายแขนง การเรียนวิชาเคมีอินทรีย์ต้องอาศัยความเข้าใจทั้งเนื้อหาและผลการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ที่มาจากการทดลอง เพราะทั้ง 2 สิ่งนี้จะทำให้ผู้เรียนได้ประจักษ์ว่า หลักการ ทฤษฎี หรือกฎเกณฑ์ต่างๆ ของเคมีอินทรีย์ เป็นสิ่งที่ถูกต้องและได้มาจากกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ผู้เรียนเมื่อสามารถทำให้ตนเองเกิดผลสัมฤทธิ์แล้ว จะต้องนำความรู้ที่ได้ถ่ายทอดไปยังสิ่งต่างๆ ที่อยู่รอบตัว เป็นต้นว่า การอธิบายการเปลี่ยนแปลง ปฏิกิริยาการ และ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับเคมีอินทรีย์ได้ นอกจากนี้วิชาเคมีอินทรีย์ยังจะเป็นพื้นฐานเบื้องต้น ในการศึกษาวิชาอื่นที่เกี่ยวข้องได้โดยตรง เช่น เคมีของผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ เคมีพอลิเมอร์ เคมีของสารประกอบโลหะอินทรีย์ และ สเตอริโอเคมี ในอินทรีย์เคมี เป็นต้น มากไปกว่านั้นยังนำไปใช้ในการศึกษาวิชาเคมีอินทรีย์ขั้นสูงในระดับปริญญาโท-เอก ด้วย สำหรับตำราเคมีอินทรีย์เล่มนี้มีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวกับไฮบริดเซชันของคาร์บอน สเตอริโอเคมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และอนุพันธ์ของไฮโดรคาร์บอนทุกชนิด ทั้งนี้ นักศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิทยาศาสตร์ทุกสาขา สามารถนำไปใช้ในการศึกษาอ้างอิงได้ เนื้อตำราแบ่งออกเป็น 19 บท ทั้งนี้รายละเอียดข้อมูล ภาพ โครงสร้าง ตารางต่างๆ ผู้เขียนได้เรียบเรียงมาจากตำราภาษาต่างประเทศ ซึ่งได้แสดงไว้ในบรรณานุกรมท้ายเล่มแล้ว ท้ายที่สุดนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าตำราเล่มนี้จะเกิดประโยชน์ต่อท่านไม่มากก็น้อย ความดีของหนังสือเล่มนี้ ขอมอบให้ บิดา มารดา ครูอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้

วิลาศ พุ่มพิมล

คำนำ	(3)
สารบัญรูป	(12)
สารบัญตาราง	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
เคมีอินทรีย์เกิดขึ้นได้อย่างไร	1
เบอร์ซีเรียส เวอเลอร์ และทฤษฎีพลังชีวิต	1
ทฤษฎีโครงสร้าง	2
ทฤษฎีอิเล็กตรอนใน โครงสร้างและการเกิดปฏิกิริยา	2
ผลกระทบของเคมีอินทรีย์	3
พันธะในโมเลกุลของสารอินทรีย์	4
- โครงสร้างอะตอม	4
- โครงสร้างทางอิเล็กตรอน	5
- จำนวนอิเล็กตรอนในชั้นพลังงาน	7
- หลักการของฮ์ฟเบา	7
- การสร้างพันธะกับกฎฮุคแปด	8
โครงสร้างเรโซแนนซ์	12
กฎของเรโซแนนซ์	13
สูตรเคมี	15
กรดและเบส	17
บทสรุป	22
คำถามท้ายบท	23
บทที่ 2 โครงสร้างและคุณสมบัติโมเลกุลสารอินทรีย์	27
สมบัติของคลิ่นอิเล็กตรอนในออร์บิทัล	27
sp^3 -ไฮบริไดเซชันและการเกิดพันธะในมีเทน	33
sp^3 -ไฮบริไดเซชันและการเกิดพันธะในอีเทน	34
sp^2 -ไฮบริไดเซชันและการเกิดพันธะในเอทิลีน	35
sp -ไฮบริไดเซชันและการเกิดพันธะในอะเซทิลีน	37
การเขียนภาพสามมิติของโมเลกุล	38

การหมุนของพันธะ	39
ความแข็งแรงของพันธะคู่	39
ไอโซเมอร์ซีม	40
ขั้วของพันธะและโมเลกุล	42
แรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างโมเลกุล	44
บทสรุป	48
คำถามท้ายบท	49
บทที่ 3 แอลเคน	53
การจำแนกชนิดของไฮโดรคาร์บอน	53
สมบัติทางกายภาพของแอลเคน	53
การใช้และแหล่งของแอลเคน	56
การเรียกชื่อแอลเคน	58
โครงสร้างและโครงรูปของแอลเคน	63
ความร้อนของการสันดาป	71
โครงรูปของไซโคลเฮกเซน	74
วงหลอมติดกัน	80
ปฏิกิริยาของแอลเคน	81
บทสรุป	83
คำถามท้ายบท	84
บทที่ 4 แอลเคน 2	87
ปฏิกิริยาคลอรีเนชันของมีเทน	87
อุณหภูมิวัด	90
ปฏิกิริยาไฮโดจิเนชันของแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนมาก	96
สารมัธยันตร์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา	99
บทสรุป	104
คำถามท้ายบท	105
บทที่ 5 แอลคิลเฮไลด์ : ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยนิวคลีโอไฟล์และการกำจัดออก	107
การเรียกชื่อแอลคิลเฮไลด์	108
การใช้ประโยชน์แอลคิลเฮไลด์	109
โครงสร้างของแอลคิลเฮไลด์	111
สมบัติทางกายภาพของสารประกอบเฮไลด์	112
การเตรียมแอลคิลเฮไลด์	114

ปฏิกิริยาของแอลคิลแฮไลด์ : ปฏิกิริยาการแทนที่และการกำจัดออก	115
ปฏิกิริยาอันดับสองของการแทนที่ด้วยนิวคลีโอไฟล์ : กลไกแบบ S_N2	116
- สเตอริโอเคมีของปฏิกิริยาแบบ S_N2	118
- การเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้กลไกแบบ S_N2	119
- ผลของโครงสร้างต่อการเกิดกลไกแบบ S_N2	121
- ความแรงของนิวคลีโอไฟล์ในกลไกแบบ S_N2	122
- ความเกาะบนนิวคลีโอไฟล์	124
- ผลของหมู่ผลออก	124
ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง การแทนที่ด้วยนิวคลีโอไฟล์ : กลไกแบบ S_N1	126
เปรียบเทียบกลไกแบบ S_N1 และ S_N2	132
ปฏิกิริยาการกำจัดออก	133
ปฏิกิริยาการกำจัดออกกับการแทนที่	139
ปฏิกิริยาอื่นๆ ของแอลคิลแฮไลด์	140
บทสรุป	143
คำถามท้ายบท	144
บทที่ 6 แอลคีน : โครงสร้างและการสังเคราะห์	149
ออร์บิทัลในพันธะคู่ของแอลคีน	149
การเรียกชื่อแอลคีน	151
แอลคีนทางการค้า	153
เสถียรภาพของแอลคีน	154
สมบัติทางกายภาพของแอลคีน	161
การสังเคราะห์แอลคีน	163
บทสรุป	171
คำถามท้ายบท	171
บทที่ 7 ปฏิกิริยาของแอลคีน	175
ปฏิกิริยาของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน	175
ปฏิกิริยาการเติมอิเล็กโตรไฟล์ของแอลคีน	177
ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอลคีน	195
โคมะโรโรเซชันและพอลิเมอไรเซชันของแอลคีน	202
บทสรุป	204
คำถามท้ายบท	205

บทที่ 8	สเตอริโอเคมี	211
	ความเป็นไครเรลลิตี	211
	กัมมันตภาพทางแสง	217
	การแยกเอแนนทิโอเมอร์ด้วยระบบสิ่งมีชีวิต	221
	ของผสมเรซีมิก	222
	ความบริสุทธิ์เชิงแสงและความเป็นเอแนนทิโอเมอร์ที่มากพอ	223
	ความเป็นไครเรลของสารระบบที่มีโครงรูป	224
	สารประกอบไครเรลที่ไม่มีไครเรลคาร์บอน	224
	ภาพฉายฟิชเชอร์	226
	ไคเอสเตอริโอไอโซเมอร์	230
	บทสรุป	233
	คำถามท้ายบท	234
บทที่ 9	สเตอริโอเคมี 2	239
	โมเลกุลที่มีไครเรลคาร์บอนมากกว่า 2 ขึ้นไป	239
	คุณสมบัติทางกายภาพของเอแนนทิโอเมอร์ และไคเอสเตอริโอไอโซเมอร์	240
	การแยกเอแนนทิโอเมอร์	242
	ประโยชน์ของโครงสร้างสมมาตรและสัมผัส	246
	ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสารกัมมันตภาพทางแสง	249
	สเตอริโอเคมีของปฏิกิริยาไคเอสเตอริโอไอโซเมอร์	255
	อิทธิพลและทรีโอของไคเอสเตอริโอไอโซเมอร์	258
	บทสรุป	259
	คำถามท้ายบท	260
บทที่ 10	แอลกอฮอล์ 1 : โครงสร้าง และ การสังเคราะห์	263
	แอลกอฮอล์ : อนุพันธ์สารอินทรีย์ของน้ำ	263
	การจำแนกประเภทของแอลกอฮอล์	264
	การเรียกชื่อแอลกอฮอล์และฟีนอล	265
	สมบัติทางกายภาพของแอลกอฮอล์	269
	แอลกอฮอล์ทางการค้า	272
	ความเป็นกรดของแอลกอฮอล์	275
	การสังเคราะห์แอลกอฮอล์	277
	บทสรุป	291
	คำถามท้ายบท	292

บทที่ 11 แอลกอฮอล์ 2 : ปฏิกริยา	297
ปฏิกริยาออกซิเดชันและรีดักชันของแอลกอฮอล์	297
ปฏิกริยาการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของแอลกอฮอล์	304
ปฏิกริยาการแทนที่: บทบาทความเป็นนิวคลีโอไฟล์ของแอลกอฮอล์	316
บทสรุป	321
คำถามท้ายบท	322
บทที่ 12 อีเทอร์และอีพอกไซด์	327
คุณสมบัติของอีเทอร์	327
การเรียกชื่ออีเทอร์	331
การสังเคราะห์อีเทอร์	335
การสังเคราะห์อีพอกไซด์	339
ปฏิกริยาของอีเทอร์	342
ปฏิกริยาของอีพอกไซด์	344
บทสรุป	348
คำถามท้ายบท	349
บทที่ 13 แอลไคน์	351
การเรียกชื่อแอลไคน์	351
โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของแอลไคน์	353
ความเป็นกรดของแอลไคน์	354
สมบัติทางกายภาพของแอลไคน์	356
การใช้ประโยชน์จากแอลไคน์	357
การสังเคราะห์แอลไคน์	359
ปฏิกริยาของแอลไคน์	363
บทสรุป	373
คำถามท้ายบท	373
บทที่ 14 สารประกอบอะโรแมติก	377
ความว่องไวในการเกิดปฏิกริยาของเบนซีน	377
โครงสร้างของเบนซีนตามแนวคิดของเคอูล์	378
รูปร่างของเบนซีน	379
การเกิดเรโซแนนซ์ของพันธะในเบนซีน	379
เสถียรภาพของเบนซีน	379

โครงสร้างไฮบริดออร์บิทัลของวงเบนซีน	381
ไฟโมเลคิวลาร์ออร์บิทัลของเบนซีน	382
แอโรเมติก แอนติแอโรเมติก และ นอนแอโรเมติก	383
แอโรเมติกไอออน	386
สารประกอบเฮเทอโรไซคลิกแอโรเมติก	391
พอลิโนเวลีเยอร์ แอโรเมติกไฮโดรคาร์บอน	393
การเรียกชื่อเบนซีนและอนุพันธ์	395
สมบัติทางกายภาพของเบนซีนและอนุพันธ์	398
บทสรุป	400
คำถามท้ายบท	401
บทที่ 15 ปฏิกริยาของเบนซีนและอนุพันธ์	405
ปฏิกริยาการแทนที่ด้วยอิเล็กโตรไฟล์	405
ผลของหมู่แทนที่ในปฏิกริยาการแทนที่ด้วยอิเล็กโตรไฟล์	411
ปฏิกริยาฟรีแรดล-คราฟต์ : การแทนที่โดยคาร์โบแคตไอออน	423
ปฏิกริยาอื่นของเบนซีนและอนุพันธ์	431
บทสรุป	443
คำถามท้ายบท	444
บทที่ 16 คีโตนและแอลดีไฮด์	449
โครงสร้างของหมู่คาร์บอนิล	449
การเรียกชื่อคีโตนและแอลดีไฮด์	450
คุณสมบัติทางกายภาพของคีโตนและแอลดีไฮด์	453
คุณสมบัติความเป็นกรด-เบสของคีโตนและแอลดีไฮด์	456
คีโตน-อินอล เทาโทเมอริซึม	458
ปฏิกริยาไฮเดรชันของคีโตนและแอลดีไฮด์	460
การใช้แอลดีไฮด์และคีโตนในโรงงานอุตสาหกรรม	461
ปฏิกริยาของแอลดีไฮด์และคีโตน	462
การสังเคราะห์คีโตนและแอลดีไฮด์	479
บทสรุป	488
คำถามท้ายบท	488
บทที่ 17 กรดคาร์บอกซิลิก	493
การเรียกชื่อกรดคาร์บอกซิลิก	493
สมบัติทางกายภาพ	499

ความเป็นกรด	500
เกลือของกรดคาร์บอกซิลิก	504
การสังเคราะห์กรดคาร์บอกซิลิก	507
ปฏิกิริยาของกรดคาร์บอกซิลิก	511
บทสรุป	520
คำถามท้ายบท	521
บทที่ 18 อนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก I : กรดแอไซด์ และ แอนไฮดรายด์	525
โครงสร้างและการเรียกชื่อ	525
คุณสมบัติทางกายภาพของอนุพันธ์คาร์บอกซิลิก	532
การแทนที่หมู่เอซิดด้วยนิวคลีโอไฟล์	534
การสังเคราะห์และปฏิกิริยา	537
บทสรุป	545
คำถามท้ายบท	546
บทที่ 19 อนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก II : การสังเคราะห์ ปฏิกิริยาของเอสเทอร์ เอไมด์ และ ไนไตร์	549
การสังเคราะห์เอสเทอร์	549
ปฏิกิริยาของเอสเทอร์	553
การสังเคราะห์เอไมด์	557
ปฏิกิริยาของเอไมด์	559
ฤทธิ์ทางชีวภาพของบีตา-แลกแทม	562
การสังเคราะห์ไนไตร์	563
ปฏิกิริยาของไนไตร์	564
อนุพันธ์อื่นๆ ของกรดคาร์บอกซิลิก	567
บทสรุป	570
คำถามท้ายบท	571

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส	5
1.2 การเกิดโนดเมื่อชั้นระดับพลังงานมากขึ้น	6
1.3 อิเล็กตรอนใน p -ออร์บิทัล	6
1.4 ธาตุบางส่วนของตารางธาตุ	7
1.5 ค่าสภาพไฟฟ้าลบ	11
2.1 การเปรียบเทียบคลื่นแบบง่าย ๆ กับอิเล็กตรอนในออร์บิทัล	28
2.2 ฟังก์ชันคลื่นและความหนาแน่นอิเล็กตรอนใน $1s$ -ออร์บิทัล	28
2.3 การเกิดโนดของการสั่นแบบฮาร์มอนิก	29
2.4 ฟังก์ชันคลื่นของ $2p$ -ออร์บิทัล	29
2.5 การสร้างพันธะในโมเลคิวลาร์ออร์บิทัล	30
2.6 พันธะซิกมา (σ) ในโมเลคิวลาร์ออร์บิทัล	30
2.7 การดำเนินการสร้างพันธะซิกมา (σ) ในโมเลคิวลาร์ออร์บิทัล	31
2.8 การดำเนินการสร้างพันธะซิกมาในโมเลคิวลาร์ออร์บิทัลของไฮโดรเจน	31
2.9 การสร้างและการดำเนินการพันธะซิกมาของ p -ออร์บิทัล	31
2.10 การสร้างพันธะซิกมาของ s -ออร์บิทัลกับ p -ออร์บิทัล	32
2.11 การสร้างและการดำเนินการพันธะไพ	32
2.12 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของคาร์บอนและการเกิด sp^3 -ไฮบริไดเซชัน	33
2.13 การเกิดพันธะซิกมาในโมเลกุลของมีเทน	34
2.14 การเกิดพันธะในโมเลกุลของอีเทน	34
2.15 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของคาร์บอนและการเกิดไฮบริไดเซชันแบบ sp^2	35
2.16 การผสมกันของออร์บิทัลใน sp^2 -ไฮบริไดเซชัน	36
2.17 การเกิดพันธะซิกมาและพันธะไพในโมเลกุลของเอทิลีน	36
2.18 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของคาร์บอนและการเกิดไฮบริไดเซชันแบบ sp	37
2.19 การเกิดไฮบริไดเซชันแบบ sp	37
2.20 การเกิดพันธะซิกมาและพันธะไพในโมเลกุลของอะเซทิลีน	38
2.21 การเกิดโครงรูปของอีเทน	39
2.22 การแตกพันธะคู่และหมุนพันธะซิกมา	39
2.23 การจำแนกหมวดหมู่ของไอโซเมอร์	41
2.24 โมเมนต์ขั้วคู่ของสารประกอบบางโมเลกุล	43
2.25 โมเมนต์ขั้วคู่ของสารประกอบบางโมเลกุลที่คล้ายกัน	43
2.26 การดึงดูดกันด้วยโมเมนต์ขั้วคู่	45

2.27	การเกิดพันธะไฮโดรเจน	45
2.28	การละลายน้ำของเกลือแกง	46
2.29	ตัวถูกละลายที่มีขั้วในตัวทำละลายไม่มีขั้ว	46
2.30	ตัวถูกละลายที่ไม่มีขั้วในตัวทำละลายไม่มีขั้ว	47
2.31	ตัวถูกละลายที่ไม่มีขั้วในตัวทำละลายมีขั้ว	47
3.1	การเปรียบเทียบจุดเดือดของแอลเคนโซ่กึ่งกับโซ่ตรง	54
3.2	การเปรียบเทียบจุดหลอมเหลวที่มีจำนวนคาร์บอนคู่และคี่	56
3.3	โครงรูปของอีเทน	64
3.4	พลังงานในแต่ละโครงรูปของอีเทน	65
3.5	พลังงานในแต่ละโครงรูปของโพรเพน	66
3.6	โครงรูปของบิวเทน	66
3.7	พลังงานในแต่ละโครงรูปของบิวเทน	67
3.8	โครงสร้างแบบซิกแซกที่เสถียร	68
3.9	พลังงานในแต่ละโครงรูปของเพนเทน	68
3.10	ความเครียดภายในวงไซโคลบิวเทน	71
3.11	ความเครียดภายในวงไซโคลโพรเพน	73
3.12	ความเครียดภายในวงไซโคลโพรเพน	73
3.13	ความเครียดภายในวงไซโคลเพนเทน	74
3.14	โครงรูปของไซโคลเฮกเซนแบบเก้าอี้	74
3.15	โครงรูปของไซโคลเฮกเซนแบบเรือ	75
3.16	พลังงานของแต่ละโครงรูปในไซโคลเฮกเซน	75
4.1	ออร์บิทัลของเมทิลเรดิคัลและเมทิลแคตไอออน	98
4.2	ค่าพลังงานของสารมัธยันตร์	99
4.3	โครงสร้างของเมทิลคาร์โบแคตไอออน	100
4.4	โครงสร้างของคาร์โบแคตไอออน	100
4.5	โครงสร้างของคาร์โบแคตไอออนที่ไม่อิ่มตัว	101
4.6	โครงสร้างและออร์บิทัลของซิงเกิลต์และทริปเลตคาร์บิน	103
5.1	พลังงานการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเมทิลไฮโอไดด์กับไฮดรอกไซด์	117
5.2	การเข้าชนด้านหลังของนิวคลีโอไฟล์เกิดการกลับของรูปทรงสี่หน้า	118
5.3	การเข้าชนของไฮดรอกไซด์ไอออนของแอลคิลแฮไลด์ 2 ชนิด	122
5.4	ไดอะแกรมแสดงพลังงานของกลไกแบบ S_N1 และ S_N2	127
5.5	การดึงโปรตอนและการเกิดพันธะไพ	134
5.6	ไดอะแกรมพลังงานของกลไกแบบ E1	135
5.7	การจัดวางออร์บิทัลในกลไกแบบ E2 ที่สถานะแทรนซิชัน	136
5.8	เปรียบเทียบการเกิดแรงผลักของการวางตัวทั้ง 2 โครงรูป	137

6.1	ความยาว มุมพันธะ และพันธะซิกมา	149
6.2	การเกิดพันธะไพในเอทิลีน	150
6.3	การขัดขวางของไพอิเล็กตรอนในการเปลี่ยนไอโซเมอร์	150
6.4	พลังงานของการเกิดไฮโดรจิเนชันของแอลคีน	154
6.5	เสถียรภาพสัมพัทธ์ของแอลคีนเมื่อเทียบกับเอทิลีน	158
6.6	พลังงานปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแอลกอฮอล์	169
7.1	อิเล็กตรอนในพันธะไพกระจายออกห่างนิวเคลียสคาร์บอน	176
8.1	วัตถุที่เป็นภาพในกระจกเงาซึ่งกันและกัน	212
8.2	หลักการการทำงานของแสงโพลาไลส์	218
8.3	หลักการการทำงานของโพลาไรมิเตอร์	219
8.4	การทำงานของสอร์โอมอนิฟิเนพรีน	221
8.5	การเกิดไฮโดรจิเนชันของบิวทาโนน	222
8.6	โครงสร้างของแอลคีน	226
8.7	ภาพฉายพีชเชอร์ของกรดแลกติก	227
9.1	การแยกเอแนนทิโอเมอร์ด้วยไครเรลโครมาโทกราฟี	246
9.2	การรีดิวิซ์ 2-เมทิลไซโคลเพนทาโนน	255
10.1	ปฏิกิริยาการพ่นน้ำและแก๊ส	272
12.1	บทบาทการเป็นตัวทำละลายของอีเทอร์	331
13.1	การหลอมซ้อนของ sp -ไฮบริดออร์บิทัล	353
13.2	การเกิดพันธะไพของอะเซทิลีน	354
14.1	พลังงานความร้อนของปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน	380
14.2	พันธะซิกมาของเบนซีน	381
14.3	$2p$ -ออร์บิทัลและการหลอมซ้อนในโมเลกุลเบนซีน	382
14.4	ไพโมเลกุลาร์ออร์บิทัลและพลังงานของเบนซีน	382
15.1	ไดอะแกรมพลังงานของปฏิกิริยาโบรมิเนชันเบนซีน	408
15.2	ปฏิกิริยาในเทอร์ชันของทอลูอิน	413
15.3	เปรียบเทียบพลังงานการเกิดปฏิกิริยาของเบนซีนและไนโตรเบนซีน	418
15.4	เปรียบเทียบพลังงานการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเบนซีนกับคลอโรเบนซีน	421
15.5	เสถียรภาพการเกิดกลไกแบบ S_N2 ที่สถานะแทรนซิชันของเบนซิลิกเฮไลด์	441
17.1	การดูดกลืนพลังงานการแตกตัวของกรดคาร์บอกซิลิก	502
17.2	แสดงการเคลื่อนที่ประจุลบบนคาร์บอกซิเลตแอนไอออน	503
18.1	เปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของไนไทร์และแอลไคโน	530
18.2	จุดเดือดของอนุพันธ์กรดคาร์บอกซิลิก	533
18.3	ไดอะแกรมแสดงพลังงานของกลไกแบบ S_N2	535
18.4	ไดอะแกรมแสดงพลังงานของกลไกการแทนที่หมู่เอซิล	536

ตารางที่	หน้า
1.1 การใช้หลักการของอับเบอจัดเรียงอิเล็กตรอนโดยเริ่มจากออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานต่ำสุด	7
1.2 สูตรโครงสร้างแบบลิวอิสและสูตรโครงสร้างแบบความแน่นของ สารประกอบ	15
1.3 สูตรโครงสร้างแบบลิวอิสและสูตรโครงสร้างแบบความแน่น ของสารประกอบที่มีพันธะคู่และพันธะสาม	16
1.4 สูตรโครงสร้างแบบความแน่น และ แบบเส้น-มุม ของสารประกอบ	16
1.5 ค่า K_u และ pK_u ของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์บางตัว	20
2.1 โมเมนต์ขั้วคู่ของพันธะโคเวเลนต์บางพันธะ	42
3.1 การจำแนกไฮโดรคาร์บอนตามชนิดของพันธะ	53
3.2 สมบัติทางกายภาพของแอลเคนไซ้ตรง	55
3.3 ส่วนต่างๆ ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม	57
3.4 การเรียกชื่อแอลเคนไซ้ตรง	59
3.5 โครงสร้างและสูตรโมเลกุลของนอร์มอล-แอลเคน 10 ตัวแรก	68
3.6 สมบัติทางกายภาพของไซโคลแอลเคนบางตัว	69
3.7 ความร้อนของการสันดาปต่อโมลของไซโคลแอลเคน	72
3.8 ความแตกต่างกันของพลังงานเมื่อหมู่เกาะที่ตำแหน่งแอกเซียลหรือ อีควาโทเรียลของไซโคลเฮกเซน	79
4.1 อัตราส่วนสมดุลของสารประกอบ 2 สาร ที่มีความแตกต่างกันของพลังงานอิสระ	91
4.2 ค่าพลังงานพันธะของการแตกแบบฮอโมลิติก	94
5.1 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของเมทิลเฮไลด์	111
5.2 ค่าไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ของสารประกอบเฮไลด์	112
5.3 ค่ารัศมีแวนเดอร์วาลส์ของเฮโลเจนในแอลคิลเฮไลด์	112
5.4 มวลโมเลกุล จุดเดือด และความหนาแน่นของแอลคิลเฮไลด์	113
5.5 ผลของหมู่แทนที่ต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ S_N2	121
5.6 ลำดับความเป็นนิวคลีโอไฟล์เมื่อใช้น้ำและแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย	123
5.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอัตราการเกิดไอออนในเซชันของบิวทิลดีดิวท์มิกคลอไรด์ ในตัวทำละลายต่างๆ	129
6.1 ค่าความร้อนของการเกิดไฮโดรจิเนชัน	157
6.2 สมบัติทางกายภาพของแอลคีนหลักบางตัว	162
8.1 สมบัติทางกายภาพของสเตอริโอไอโซเมอร์	217

10.1	สมบัติทางกายภาพของแอลกอฮอล์	270
10.2	แสดงการละลายน้ำของแอลกอฮอล์	271
10.3	ค่าคงที่การแตกตัวของแอลกอฮอล์	276
12.1	จุดเดือดของอีเทอร์ แอลเคน และ แอลกอฮอล์ ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน	329
12.2	สมบัติทางกายภาพของอีเทอร์	330
13.1	สมบัติทางกายภาพของแอลไน์	357
14.1	สมบัติทางกายภาพของเบนซีนและอนุพันธ์	399
15.1	การจำแนกหมู่แทนที่ของเบนซีนและความแรงเมื่อเทียบกับไฮโดรเจน	424
16.1	ชื่อสามัญของแอลดีไฮด์	452
16.2	สมบัติทางกายภาพของคีโตนและแอลดีไฮด์ที่สำคัญ	455
17.1	สมบัติทางกายภาพของกรดคาร์บอกซิลิก	496
17.2	สมบัติทางกายภาพของกรดไดคาร์บอกซิลิก	498
17.3	ค่าความเป็นกรด	501
17.4	ค่า K_a และ pK_a ของกรดที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอน	504
18.1	จุดเดือดและจุดหลอมเหลวของเอไมด์และสารอื่นที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน	534
18.2	การละลายน้ำของอนุพันธ์คาร์บอกซิลิก	534

รากฐานของวิทยาศาสตร์แท้จริงแล้วเกิดขึ้น โดยความอยากรู้อยากเห็นของมนุษย์และเป็นที่น่าประหลาดว่าบรรพบุรุษของมนุษย์เมื่อหลายพันปีก่อนสามารถนำไฟมาใช้ได้อย่างไร สีและกลิ่นของธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วไปเป็นสัญญาณของการส่งข่าวสารว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น หากเอาผ้ามาผูกตาไว้ก็สามารถรู้ได้ว่าป่าสนและชายฝั่งทะเลไปทางไหน คำถามที่ตามมาคือไฟเกิดขึ้นได้อย่างไร อะไรเป็นสาเหตุที่ทำให้ป่าสนมีความหอม ทำไมใบไม้สีเขียวร่วงหล่นเป็นสีแดง ส้ม และสีทอง จากข้อสังเกตข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว เป็นสิ่งที่น่าค้นคว้าหาคำตอบทั้งสิ้น

เคมีอินทรีย์เกิดขึ้นได้อย่างไร

ในระยะแรกๆ ยังขาดเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการค้นคว้าทางด้านวิทยาศาสตร์ แต่ก็ยังมีความพยายามที่จะศึกษาสารและการเปลี่ยนแปลงบ้างแล้ว ขณะนั้นการศึกษาดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งปลายศตวรรษที่ 18 ลาวัซซีเย (Lavoisier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีสามารถพิจารณาจากปริมาณน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และอื่นๆ เมื่อนำสารมาเผาในอากาศ ผลการศึกษาของลาวัซซีเยทำให้เกิดความก้าวหน้าทางเคมีออกเป็น 2 สาขา คือ เคมีอินทรีย์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการอธิบายว่าสิ่งมีชีวิตสามารถสร้างสารออกมาได้ และการศึกษาสารที่ไม่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต คือ เคมีอนินทรีย์ จากการวิเคราะห์การสันดาปของลาวัซซีเยพบว่า อนุพันธ์ของสารประกอบจากธรรมชาติจะประกอบด้วยธาตุคาร์บอน จึงเป็นที่มาของการให้คำจำกัดความของเคมีอินทรีย์ก็คือการศึกษาเกี่ยวกับสารประกอบของคาร์บอนนั่นเอง และในปัจจุบันก็ยังคงใช้ความหมายนี้

เบอร์ซีเรียส เวอเลอร์ และทฤษฎีพลังชีวิต

ช่วงต่อของศตวรรษที่ 18 และ 19 เบอร์ซีเรียส (Berzelius) เป็นผู้ที่สร้างคุณูปการอย่างมากมายในแง่ของการเป็นผู้นำทางด้านการค้นคว้าทางยา จึงทำให้เกิดแขนงความรู้ทางเคมีอย่างกว้างขวางและในปี ค.ศ. 1807 เบอร์ซีเรียส ได้บัญญัติคำศัพท์ที่ใช้ศึกษาทางด้านเคมีผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ เบอร์ซีเรียสซึ่งเหมือนกับทุกคนในขณะนั้นที่รู้จักว่า ในสิ่งมีชีวิตจะมีพลังชีวิตอยู่ภายในตัวซึ่งจะหมดไปหากสิ่งมีชีวิตนั้นตายลงแล้ว และสารประกอบเคมีที่มาจากธรรมชาติจะแตกต่างไปจากสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งในขณะที่สารอนินทรีย์สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ แต่สารอินทรีย์ไม่สามารถกระทำได้ และไม่ได้มาจากสารอนินทรีย์

ในปี ค.ศ. 1823 เวอเลอร์ (Wöhler) เพิ่งสำเร็จการศึกษาทางด้านแพทยศาสตร์จากประเทศเยอรมนี และมาศึกษาต่อกับเบอร์ซีเรียสที่สต็อกโฮล์ม (Stockholm) 1 ปีต่อมา เบอร์ซีเรียสได้มอบหมายให้สอนวิชา

เรโซแนนซ์ (resonance) ในครั้งนี้นักเคมีได้ทราบถึงหลักการของการเกิดพันธะ ซึ่งพัฒนามาเป็นคำตอบที่ว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างไร โดยนักเคมีอินทรีย์ 2 ท่าน คือ โรบินสัน (Robinson) และ อินโกลด์ (Ingold)

โรบินสันได้สนใจเคมีที่เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ธรรมชาติและเป็นผู้เชี่ยวชาญมาก สามารถนำเอาทฤษฎีโครงสร้างของลิวอิสมาประยุกต์เข้าสู่การอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นว่าจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงอิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดความเข้าใจตรงกันตั้งแต่นั้นมา แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาค้นคว้าที่ช่วยเสริมให้เกิดข้อยืนยันก็คือ โรบินสันได้พยายามวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีอินทรีย์โดยพิจารณาที่อิเล็กตรอนและทำความเข้าใจว่าจะต่อจะเคลื่อนที่ไปด้วยขณะเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากมีอิเล็กตรอนอยู่บนตัวมันนั่นเอง อินโกลด์ได้นำวิธีการทางเคมีฟิสิกัลมาศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีอินทรีย์ยังทำให้เกิดความเข้าใจในสิ่งที่เกิดขึ้นว่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นสารผลิตภัณฑ์จะต้องมี **กลไก (mechanism)** ในการเกิดปฏิกิริยาภายใต้เงื่อนไขของปฏิกิริยาที่กำหนดไว้

จากความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกพื้นฐานของการเกิดปฏิกิริยาทำให้มองเห็นภาพชัดของสาร **สารมัธยันตร์ (intermediate)** ว่าเป็นอย่างไร แม้กระทั่งการนำมาอธิบายในระบบของสิ่งมีชีวิตและใช้อธิบายเพื่อตอบคำถามต่างๆ ได้อย่างมากมาย

ผลกระทบของเคมีอินทรีย์

สารประกอบอินทรีย์ได้เป็นที่รู้จักและถูกนำมาใช้ประโยชน์นานแล้วจวบจนถึงปัจจุบันได้มีการผลิตและนำสารเหล่านั้นมาผสมในเครื่องสำอางประเภทแอลกอฮอล์หรือน้ำสัสมายจากไวน์ ชาวจีนสมัยก่อนมีการนำพืชสมุนไพรมาใช้รักษาโรค โดยเฉพาะยาชื่อ ม่าฮวง (Ma Huang) สกัดมาจากพืชชาดังกล่าว มีสรรพคุณในการกระตุ้น การเพิ่มความดันโลหิต ซึ่งยานี้ในปัจจุบันพบว่ามีสารอีเฟดรีน (ephedrine) อย่างไรก็ดีตามยังมียาอีกมากที่มาจากธรรมชาติและสามารถสังเคราะห์ได้แล้วในปัจจุบัน

ก่อนพุทธกาลประมาณ 2500 ปี ที่ประเทศอินเดียมีการใช้คราม (indigo) ในการย้อมผ้า นอกจากนี้พบว่าชาวเฟนิเซียน (ตั้งอยู่ที่ประเทศซีเรียปัจจุบัน) ได้มีการนำสีย้อมสีม่วง (Tyrian purple) ซึ่งสกัดมาจากหอยแห่งทะเลเมดิเตอร์เรเนียน ซึ่งเป็นสีม่วงที่สวยงามมากจนเป็นที่ยอมรับกันในราชสำนักต่างๆ และปี ค.ศ. 1856 วิลเลียม เฮนรี เพอร์คิน (William Henry Perkin) ขณะนั้นยังเป็นนักศึกษา อายุ 18 ปี ได้ค้นพบวิธีการเตรียม สีย้อมม่วงเข้มโดยบังเอิญซึ่งเรียกว่า มัววิน (Mauveine) การค้นพบของเพอร์คินนี้ทำให้เป็นรากฐานของการสังเคราะห์สีย้อมในปัจจุบันซึ่งเป็นการเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัยทางด้านเคมีและโรงงานผู้ผลิตในเวลาต่อมา

สำหรับการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ได้เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1928 โดยบริษัท ลัวด์ (Lured) และศาสตราจารย์ คาร์โรเทอร์ (Carothers) จากมหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ด 2-3 ปีต่อมา คาร์โรเทอร์และผู้ร่วมงานได้ผลิตไนลอนซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์ตัวแรกและนีโอพรีน (neoprene) ออกมาแทนยางจากธรรมชาติ การประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์เส้นใยเทียมทั้ง 2 ชนิดนี้ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงในเชิงเศรษฐกิจอย่างมาก

ความเจริญเติบโตของเคมีอินทรีย์ในช่วงศตวรรษนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีสารตั้งต้นสำหรับการผลิตที่ราคาถูก เช่น ปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติซึ่งนำมาสังเคราะห์โมเลกุลสารที่มีขนาดใหญ่

ขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการพัฒนาด้านเคมีปิโตรเลียมทำให้เกิดความสะดวกสบายแก่ชีวิตความเป็นอยู่ยิ่งขึ้น เพราะผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยา พลาสติก เส้นใยสังเคราะห์ ฟิล์ม และยาง ล้วนเกิดจากการนำสารอินทรีย์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมทั้งสิ้น ความพยายามของนักวิทยาศาสตร์ในโรงงานอุตสาหกรรมไม่ได้หยุดแต่เพียงเท่านั้น แต่ยังมีการเสาะแสวงหาแหล่งธาตุคาร์บอน ซึ่งก็คือคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในการเตรียมสารอินทรีย์และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย

การพัฒนากระบวนการผลิตดำเนินต่อไปอย่างไม่หยุดยั้งได้มีการนำสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นมาใช้อย่างรวดเร็วที่เรียกว่า **ตัวเร่งปฏิกิริยา** (catalyst) นอกจากนี้ยังได้พัฒนาทางด้านชีวเคมีโดยนำเอนไซม์มาใช้ประโยชน์ในเชิงการแพทย์ เช่น การรักษาโรคที่เกิดขึ้นในระบบเซลล์และกระบวนการเมแทบอลิซึม เป็นต้น

จากผลกระทบของเคมีอินทรีย์ที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เคมีอินทรีย์ได้รับการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ผลการเปลี่ยนแปลงยังประโยชน์ต่อมนุษย์ในทุกๆ ด้านเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามผลแห่งความเจริญเกิดขึ้นมากเท่าใด ความเสื่อมโทรมเนื่องจากผลของการใช้สารอินทรีย์ก็เกิดขึ้นเป็นเงาตามตัว ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องจะได้หาทางแก้ไขต่อไป

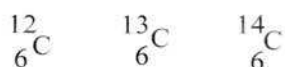
พันธะในโมเลกุลของสารอินทรีย์

หากจะต้องเข้าใจถึงสมบัติปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์แล้วจะต้องเริ่มที่โครงสร้างก่อน เพราะสารประกอบเหล่านั้นเกิดจากการที่อะตอมต่างๆ มารวมกัน ถึงแม้ว่าในวิชาเคมีทั่วไปจะกล่าวถึงบ้างแล้ว แต่ในบทนี้จะแตกต่างกันในบางมุมมอง เนื่องจากแนวคิดที่จะนำเสนอต่อไปนี้ จะเน้นถึงรายละเอียดเกี่ยวกับอะตอม และโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ ซึ่งจะนี้เป็นพื้นฐานของความเข้าใจในเคมีอินทรีย์ขั้นสูงต่อไป

1. โครงสร้างอะตอม

อะตอมประกอบด้วยโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน จะพบประจุบวกของโปรตอนและอนุภาคที่ไม่มีประจุคือ นิวตรอนรวมอยู่ในนิวเคลียสของอะตอม ส่วนอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบและมีจำนวนเท่ากับโปรตอนจะโคจรรอบๆ นิวเคลียส ทั้งโปรตอนและนิวตรอนจะมีมวลเป็น 1,800 เท่าของอิเล็กตรอน ดังนั้นมวลอะตอมส่วนใหญ่จะเป็นมวลของนิวเคลียสนั่นเอง สำหรับอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในส่วนของการสร้างพันธะและการเกิดปฏิกิริยา

ธาตุแต่ละธาตุจะแตกต่างกันที่จำนวนโปรตอน แต่ถ้าธาตุชนิดเดียวกันมีโปรตอนเท่ากันแต่จำนวนนิวตรอนแตกต่างกันเราเรียกว่า **ไอโซโทป** (isotope) ตัวอย่างเช่น ไอโซโทปของธาตุคาร์บอน



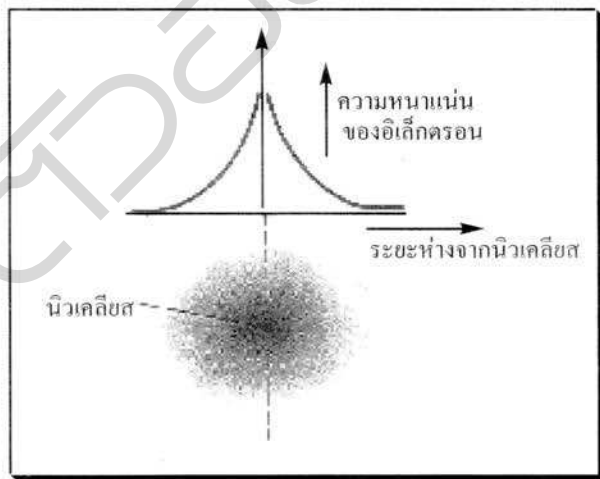
จากไอโซโทปทั้งสามมีนิวตรอนเท่ากับ 6, 7 และ 8 ตามลำดับสำหรับคาร์บอนไอโซโทป C-14 เป็นธาตุกัมมันตรังสีมีครึ่งชีวิต 5,730 ปี ซึ่งอาศัยธาตุนี้ในการคำนวณหาอายุของอินทรีย์วัตถุที่ย้อนขึ้นไปได้ถึง 50,000 ปี

2. โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์

สมบัติทางเคมีของธาตุพิจารณาจาก จำนวนโปรตอนและอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียส เพราะการสร้างพันธะของอิเล็กตรอนผลก็คือ การเกิดโครงสร้างโมเลกุลนั่นเอง เนื่องจากอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กมาก และเราจึงแสดงสมบัติเป็นได้ทั้งอนุภาคและคลื่น อย่างไรก็ตามพบว่าอิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลจะแสดงสมบัติความเป็นคลื่นมากกว่าอนุภาค

อิเล็กตรอนของอะตอมในออร์บิทัล (orbital) นั้น ซึ่งจากหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg uncertainty principle) กล่าวว่าอิเล็กตรอนจะไม่อยู่ประจำที่ขึ้นอยู่กับการพบความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ณ ที่ใดในออร์บิทัล โดยทั่วไปแล้วในแต่ละออร์บิทัลจะมีการกระจายของอิเล็กตรอนไม่เท่ากันและหมายถึงพลังงานของอิเล็กตรอนในออร์บิทัลจะไม่เท่ากันด้วย ถ้าคิดง่ายๆ ว่าอิเล็กตรอนเป็นคลื่นและความหนาแน่นของมันคือส่วนที่เป็นแอมพลิจูดของคลื่นแล้ว ในบทต่อไปเราจะใช้สัญลักษณ์คลื่นนี้ทำความเข้าใจเกี่ยวกับการสร้างพันธะของสารประกอบอินทรีย์ต่อไป

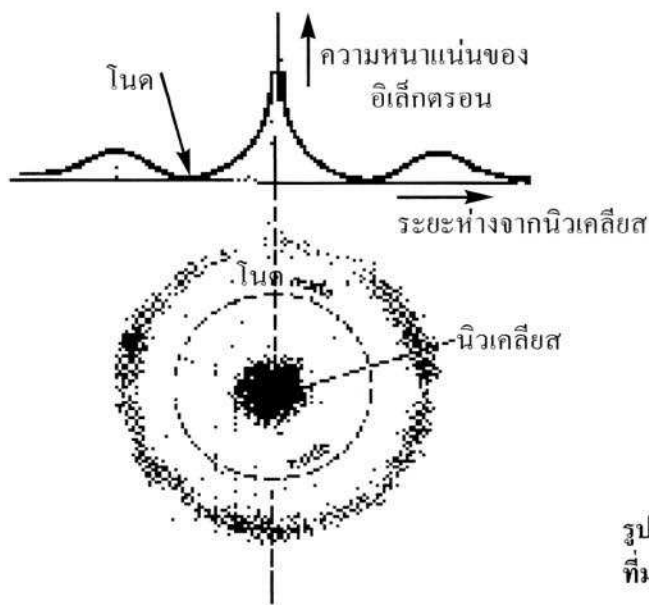
ออร์บิทัลของธาตุหรือของอะตอมเราเรียกว่า อะตอมมิกออร์บิทัล ธาตุที่อยู่ 2 แถวแรกของตารางธาตุจะมีอิเล็กตรอนประจำอยู่ที่ชั้น $n=1$ และ $n=2$ สำหรับอิเล็กตรอนชั้นแรก ($n=1$) จะประกอบด้วย $1s$ ออร์บิทัลและออร์บิทัลนี้จะมีรูปร่างเป็นทรงกลมที่สมมาตร (spherically symmetrical) ถ้านึกถึงฝ้ายเมล็ดฝ้ายตรงกลางเปรียบเสมือนนิวเคลียสและใยฝ้ายคืออิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสนั่นเอง มีข้อสังเกตว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออยู่ห่างจากนิวเคลียส ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส

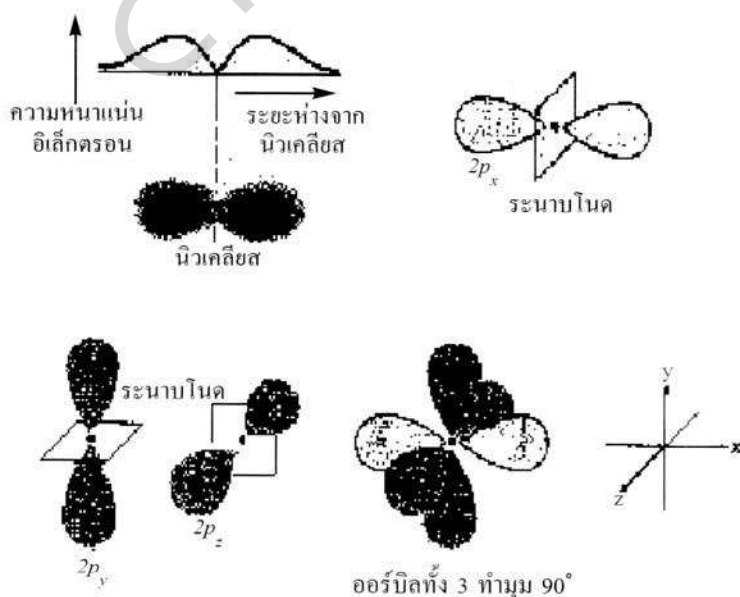
ที่มา (Wade, 1987, p.3)

สำหรับอิเล็กตรอนในชั้นที่ $n=2$ ประกอบด้วยออร์บิทัลที่แตกต่างกันคือ $2s$ และ $2p$ ซึ่ง $2s$ ออร์บิทัลจะมีลักษณะเป็นทรงกลมเหมือนกับ $1s$ อย่างไรก็ตามออร์บิทัล $2s$ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยกว่า $1s$ ออร์บิทัล ถ้าจะกล่าวในแง่ของพลังงานอิเล็กตรอนในออร์บิทัล $2s$ จะสูงกว่า $1s$ เนื่องจากอยู่ห่างนิวเคลียสมากกว่าและจะปรากฏบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนในออร์บิทัล $2s$ ด้วยเรียกบริเวณนั้นว่า โหนด (node) ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การเกิดโนดเมื่อชั้นระดับพลังงานมากขึ้น
ที่มา (Wade, 1987, p.4)

นอกจากนี้พบว่าออร์บิทัล $2p$ ในชั้นที่ $n=2$ ประกอบด้วยอะตอมมิกออร์บิทัล 3 ออร์บิทัล คือ $2p_x$, $2p_y$ และ $2p_z$ ดังรูปที่ 1.3 และแต่ละออร์บิทัลจะมีทิศทางที่ชี้ไปยังแกน x , y และ z ตามลำดับ ออร์บิทัล $2p$ จะมีพลังงานสูงกว่า $2s$ เล็กน้อยเนื่องจากอยู่ห่างนิวเคลียสมากกว่า ออร์บิทัล p จะประกอบด้วย 2 โลบ (lobe) ทั้งซ้ายและขวาโดยตรงกลางไม่มีอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกว่า ระนาบโนด (nodal plane) อะตอมมิกออร์บิทัลทั้ง 3 ถึงแม้จะมีทิศทางแตกต่างกัน แต่ก็มีพลังงานเท่ากัน เรียกออร์บิทัลลักษณะนี้ว่า ดีเจเนอเรต ออร์บิทัล (degenerate orbital) ธาตุที่มีความสำคัญมากและเป็นองค์ประกอบในสารอินทรีย์ก็คือธาตุที่มีอิเล็กตรอน 2 ชั้นระดับพลังงานหรือแถวที่ 2 ของตารางธาตุ ส่วนธาตุอื่นๆ จะไม่ขอกล่าวในที่นี้



รูปที่ 1.3 อิเล็กตรอนใน p -ออร์บิทัล
ที่มา (Wade, 1987, p.4)

3. จำนวนอิเล็กตรอนในชั้นพลังงาน

จากหลักการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) กล่าวว่าแต่ละออร์บิทัลจะมีอิเล็กตรอนอยู่ 2 อิเล็กตรอน ดังนั้นในออร์บิทัล $1s$ ก็จะมีอิเล็กตรอน 2 อิเล็กตรอน และ $2s$ และ $2p$ รวมแล้วมีอิเล็กตรอนถึง 8 อิเล็กตรอน การที่อะตอมจะสร้างพันธะจะต้องทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้นนอกสุด (valence electron) คล้ายหรือเหมือนกับแก๊สเฉื่อย (He, Ne, และ Ar) ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วย 8 อิเล็กตรอน และสอดคล้องกับกฎแปด (octet rule) ที่ว่าธาตุในแถวที่ 2 มักจะทำให้อิเล็กตรอนชั้นนอกสุดครบแปดเพื่อจะได้สารประกอบที่เสถียรนั่นเอง

4. หลักการของออฟเบา

ในเยอรมันเรียกออฟเบา (Aufbau) ว่าเป็นผู้สร้างหรือผู้สะสม (building up) และถ้าตามหลักการของออฟเบาก็คือ เรามีวิธีการจัดเรียงอิเล็กตรอนอย่างไรที่สถานะพื้น ซึ่งทำโดยเริ่มจากออร์บิทัลที่มีพลังงานต่ำสุดก่อน (lowest energy orbital) แล้วเลื่อนไปสู่ออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงสุด (highest energy orbital) ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 1.4 และ ตารางที่ 1.1 จะแสดงการใช้หลักการของออฟเบาจัดเรียงอิเล็กตรอนของธาตุ 2 แถวแรก

IA		แสดงบางส่วนของตารางธาตุ										VIIIA
H	IIA											He
Li	Be	III A	IV A	V A	VIA	VII A						Ne
Na	Mg	B	C	N	O	F						Ar
		Al	Si	P	S	Cl						

พลังงาน ↑

———— $2p_x, 2p_y, 2p_z$

———— $2s$

———— $1s$

พลังงานออร์บิทัลสัมพัทธ์

รูปที่ 1.4 ธาตุบางส่วนของตารางธาตุ
ที่มา (Wade, 1987, p.5)

ตารางที่ 1.1 การใช้หลักการของออฟเบาจัดเรียงอิเล็กตรอนโดยเริ่มจากออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานต่ำสุด

ธาตุ	การจัดเรียงอิเล็กตรอน	อิเล็กตรอนวงนอกสุด
H	$1s^1$	1
He	$1s^2$	2
Li	$1s^2 2s^1$	1
Be	$1s^2 2s^2$	2
B	$1s^2 2s^2 2p_x^1$	3
C	$1s^2 2s^2 2p_x^1 2p_y^1$	4
N	$1s^2 2s^2 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^1$	5
O	$1s^2 2s^2 2p_x^2 2p_y^1 2p_z^1$	6
F	$1s^2 2s^2 2p_x^2 2p_y^2 2p_z^1$	7
Ne	$1s^2 2s^2 2p_x^2 2p_y^2 2p_z^2$	8

ที่มา (Wade, 1987, p.6)

จะเห็นได้ว่าชั้นพลังงานที่ $n=2$ มีอิเล็กตรอนรวมกันแล้วก็คือเลขที่หมู่ (group) ในตารางธาตุ และเป็นอิเล็กตรอนวงนอกสุดของธาตุนั้นเอง ธาตุฮีเลียมมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 2 และนีออนเท่ากับ 8 ซึ่งเป็นการบรรจุอิเล็กตรอนในชั้นแรก ($n=1$) และ ชั้นที่สอง ($n=2$) ตามลำดับ

เป็นที่สังเกตว่าธาตุคาร์บอนมีอิเล็กตรอนวงนอกที่ออร์บิทัล $2p_x$ และ $2p_y$ จะบรรจุไม่เป็นคู่ จึงไม่เป็นไปตามหลักการของเพาลีที่ว่าอิเล็กตรอนจะอยู่กันเป็นคู่ๆ ในออร์บิทัลเดียวกัน อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาตามกฎของฮุนด์ (Hund rule) แล้วถ้ามีจำนวน 2 หรือ 3 ออร์บิทัลที่พลังงานเท่ากัน อิเล็กตรอนจะกระจายไปอยู่ในออร์บิทัลเหล่านั้นเดี่ยวๆ แทนที่จะอยู่เป็นคู่ เช่น ธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน ส่วนธาตุออกซิเจน ฟลูออรีน และนีออน ที่มีอิเล็กตรอนวงนอกมากกว่า 3 อิเล็กตรอนขึ้นไป การบรรจุอิเล็กตรอนก็จะเริ่มที่ละหนึ่งในออร์บิทัล $2p_x$, $2p_y$ และ $2p_z$ ก่อน จากนั้นอิเล็กตรอนที่เหลือให้กลับมาบรรจุที่ $2p_x$ ตามด้วย $2p_y$ และ $2p_z$ เป็นรอบที่สองตามลำดับ ตัวอย่างเช่น การจัดเรียงอิเล็กตรอนของธาตุฟลูออรีน



5. การสร้างพันธะกับกฎชุดแปด

ในปี ค.ศ. 1915 ลิวิสได้เสนอทฤษฎีใหม่ๆ ไว้หลายทฤษฎี ซึ่งการอธิบายว่าอะตอมมีการสร้างพันธะแล้วเกิดเป็นโมเลกุลของสารประกอบได้อย่างไร และหนึ่งในหลายทฤษฎีเหล่านั้นเสนอว่า อะตอมจะนำอิเล็กตรอนวงนอกสุดมาใช้ร่วมกัน และเมื่อนับจำนวนอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะและที่เหลือแล้วจะมีจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนวงนอกของแก๊สสมมติ เช่น He, Ne หรือ Ar ซึ่งแนวคิดนี้ได้กลายเป็นกฎชุดแปดในเวลาต่อมา

5.1 พันธะไอออนิก อะตอมมีการให้อิเล็กตรอนแก่อะตอมอื่น เช่น ลิเทียมให้อิเล็กตรอน 1 อิเล็กตรอนแก่ฟลูออรีนทำให้มีอิเล็กตรอนวงนอกเหมือนกับฮีเลียม ในขณะที่ฟลูออรีนรับอิเล็กตรอนมาจากลิเทียม 1 ตัว ทำให้มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดเหมือนกับนีออน ดังนั้นผลจากการให้และรับอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดประจุบวกที่ลิเทียมและประจุลบที่ฟลูออรีนดังแสดง



การดึงดูดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตหรือประจุที่ตรงข้ามกันนี้เรียกว่าพันธะไอออนิก โดยทั่วไปแล้ว โครงร่างผลึกส่วนใหญ่จะยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงพันธะไอออนิกมากกว่าจะอยู่เป็นโมเลกุลแบบเดี่ยวๆ และ ไม่พบว่าสารอินทรีย์ต่างๆ ไปยึดเหนี่ยวพันธะด้วยแรงไอออนิกเลย

5.2 พันธะโคเวเลนต์ สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ตัวอย่างเช่น การเกิดโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งจะนำอิเล็กตรอนของตัวมันเองมาใช้ร่วมกันทำให้อิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะเท่ากับเวเลนซ์อิเล็กตรอนของฮีเลียม



พันธะโคเวเลนต์เป็นแรงดึงดูดที่สำคัญมากในเคมีอินทรีย์ ซึ่งจะได้ศึกษารายละเอียดในบทต่อไป

5.3 โครงสร้างของลิวอิส การแสดงการเกิดพันธะโคเวเลนต์ทำได้โดยการเขียนสูตรโครงสร้างแบบลิวอิส (Lewis structure) เช่น ใช้ $\text{H}:\text{H}$ แทนโมเลกุลของ H_2 นอกจากนี้จะใช้จุดแทนเวเลนซ์อิเล็กตรอน และเส้น (—) แทนอิเล็กตรอน 1 คู่ ดังแสดง

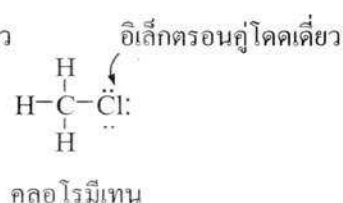
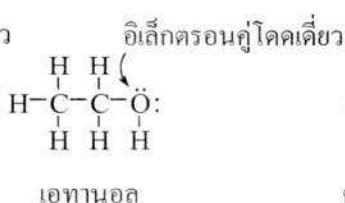
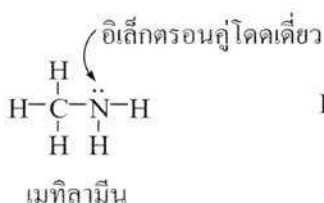


ธาตุคาร์บอนมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว และนำมาใช้ร่วมกับไฮโดรเจน 4 อะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะทั้งหมดจึงเท่ากับ 8 ซึ่งเป็นไปตามกฎชุดแปด เมื่อพิจารณาสูตรโมเลกุลของอีเทนคือ C_2H_6 สูตรโครงสร้างแบบลิวอิสของมันจะแสดงข้างล่าง

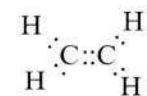


จะเห็นว่าจำนวนอิเล็กตรอนที่ปรากฏขณะนี้เป็น 14 อิเล็กตรอน ซึ่งล้อมรอบธาตุคาร์บอนอยู่ 8 อิเล็กตรอน และไฮโดรเจนแต่ละตัว 2 อิเล็กตรอน ดังนั้นโครงสร้างที่เป็นไปได้ของอีเทนจะมีเพียงโครงสร้างเดียว และจากโครงสร้างของอีเทนนี้เองแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญของคาร์บอนที่สร้างพันธะระหว่างกันได้อย่างแข็งแรง

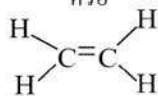
ถ้าพิจารณาโครงสร้างโมเลกุลต่างๆ บางโครงสร้างจะมีอิเล็กตรอนที่ไม่ได้สร้างพันธะ (non-bonding electron) เรียกอิเล็กตรอนที่ไม่ได้สร้างพันธะและอยู่กันเป็นคู่ๆ ว่า อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) ดังกล่าวนี้นี้จะทำให้อะตอมมีอิเล็กตรอนวงนอกครบแปด ตัวอย่างเช่น ธาตุออกซิเจน ไนโตรเจน และแฮโลเจน (F, Cl, Br, I) มักจะมีอิเล็กตรอนลักษณะนี้แล้วทำให้สารประกอบเหล่านั้นเสถียร ในเชิงปฏิกิริยาเคมีอินทรีย์อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเหล่านี้จะมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบนั้นได้ ตัวอย่างหน้าถัดไปแสดงอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของสารต่างๆ



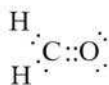
5.4 พหุพันธะ ในการเขียนสัญลักษณ์จุดหรือเส้นแทนอิเล็กตรอน 1 คู่ นั้นเรียกพันธะโคเวเลนต์แบบนี้ว่า **พันธะเดี่ยว** (single bond) ขณะที่อะตอมมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 2 คู่ หรือ 3 คู่ ก็จะเรียกว่า **พันธะคู่** (double bond) และ **พันธะสาม** (triple bond) ตามลำดับ เช่น โมเลกุลของเอทิลีน (C_2H_4) ซึ่งมีเพียงทางเดียวเท่านั้นที่จะเขียนสูตรโครงสร้างแบบลิวอิส คือการนำเอาอะตอมของคาร์บอน 2 อะตอม มาใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 2 คู่ จึงจะทำให้ครบกฎชุดแปดดังกล่าว



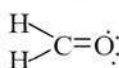
หรือ



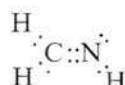
เอทิลีน



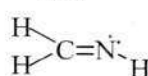
หรือ



ฟอร์มัลดีไฮด์



หรือ



อิมิน

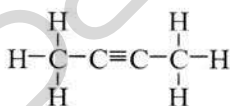
สำหรับแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) เป็นตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่มีพันธะสามในโมเลกุล ดังนั้นสูตรโครงสร้างแบบลิวอิสจึงเขียนโดยการนำคาร์บอนมาใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 3 คู่ จึงจะครบกฎชุดแปด และใช้เส้นสามเส้นแทนพันธะสามดังแสดง



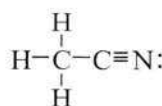
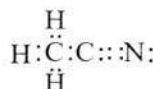
หรือ



อะเซทิลีน



ไดเมทิลอะเซทิลีน



แอซีโทไนไตร์

ข้อสังเกตจากการเขียนสูตรโครงสร้างของลิวอิสพบว่าคาร์บอนจะมีการสร้างพันธะ 4 พันธะ ไฮโดรเจน 3 พันธะ และออกซิเจน 2 พันธะ ส่วนไฮโดรเจนและแฮโลเจน มักจะสร้างเพียง 1 พันธะ ดังสัญลักษณ์ข้างล่าง



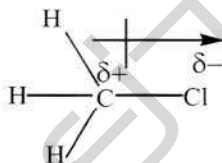
5.5 สภาพไฟฟ้าลบและขั้วพันธะ พันธะที่เกิดจากการที่อะตอมของธาตุเหมือนกันมาใช้อิเล็กตรอนร่วมกันเรียกว่า **พันธะไม่มีขั้ว** (nonpolar bond) แต่ถ้าเป็นอะตอมต่างชนิดกันมาสร้างพันธะ และพันธะที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า **พันธะมีขั้ว** (polar bond) การที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอะตอมดังกล่าวมีค่าสภาพไฟฟ้าลบแตกต่างกัน ซึ่งค่าสภาพไฟฟ้าลบของธาตุที่พบในสารอินทรีย์ส่วนใหญ่แสดงไว้ในรูปที่ 1.5

H 2.2						
Li 1.0	Be 1.6	B 1.8	C 2.5	N 3.0	O 3.4	F 4.0
Na 0.9	Mg 1.3	Al 1.6	Si 1.9	P 2.2	S 2.6	Cl 3.2
						Br 3.0
						I 2.7

รูปที่ 1.5 ค่าสภาพไฟฟ้าลบ

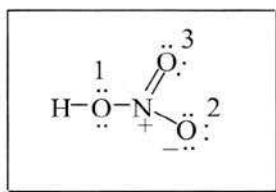
ที่มา (Wade, 1987, p.10)

สมมติว่าธาตุคาร์บอนมาสร้างพันธะกับธาตุคลอรีนซึ่งมีค่าสภาพไฟฟ้าลบสูงกว่า คลอรีนจะดึงอิเล็กตรอนก่อนไปทางตัวมันเราจะใส่สัญลักษณ์ δ^+ (partial positive charge) ที่คาร์บอนและ δ^- (partial negative charge) ที่คลอรีน นอกจากนี้จะใส่ลูกศรให้หันหัวไปทางด้านที่อะตอมค่าสภาพไฟฟ้าลบสูงกว่า ความมีขั้วของพันธะวัดออกมาเป็นค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment, μ)



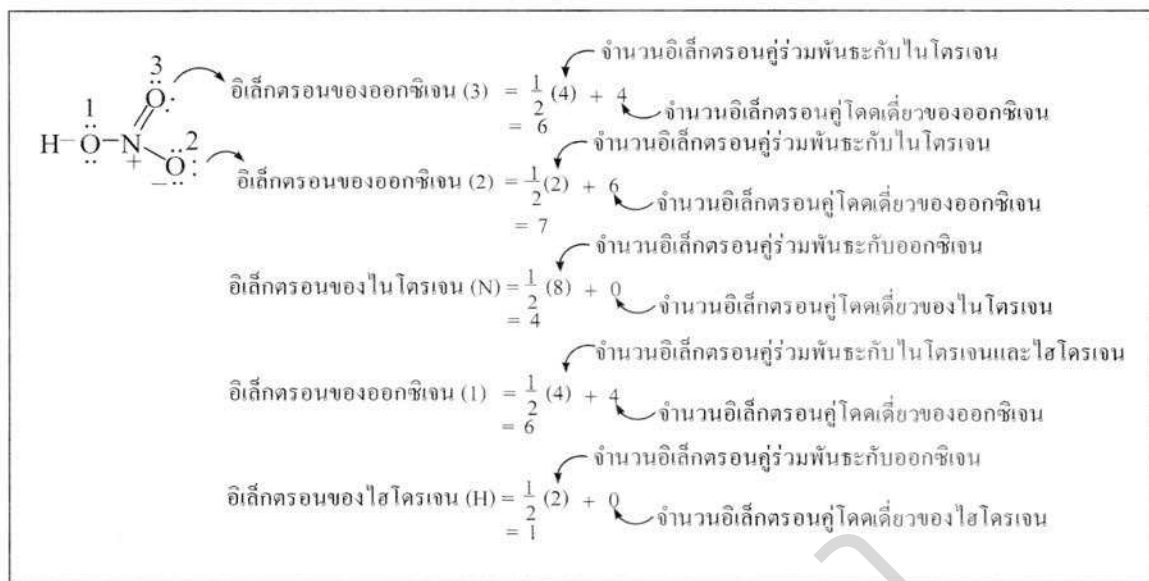
ถ้ามองย้อนกลับไปที่ค่าสภาพไฟฟ้าลบ ดังรูป 1.5 ค่านี้จะเป็นตัวบอกความมีขั้วของพันธะและทิศทางโมเมนต์ขั้วคู่ นั้นหมายถึงการบอกความมีขั้วของพันธะโคเวเลนต์ด้วย

5.6 ประจุฟอร์มัล จากโครงสร้างของลิวอิสมักมีอะตอมที่เกาะอยู่กับประจุบวกและประจุลบ ถ้าโมเลกุลนั้นเป็นกลางผลรวมของประจุบวกก็จะต้องเท่ากับศูนย์ ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของกรดไนตริก



จากโครงสร้างจะเห็นว่าออกซิเจนทั้ง 3 อะตอม มีลักษณะแตกต่างกันคือ ออกซิเจน 1 สร้างพันธะอยู่กับไฮโดรเจนและไนโตรเจน ส่วนออกซิเจน 2 พันธะเดียวอยู่กับไนโตรเจนและติดประจุลบอยู่ด้วย และสุดท้ายออกซิเจน 3 สร้างพันธะคู่อยู่กับไนโตรเจน พบว่าโครงสร้างของกรดไนตริกที่เห็นอยู่ขณะนี้เป็นที่ยอมรับและเราเรียกประจุบวกและลบในโครงสร้างว่า **ประจุฟอร์มัล**

การคำนวณประจุฟอร์มัลทำได้โดยการนับจำนวนอิเล็กตรอน (electron count) ของแต่ละอะตอมในสูตรโครงสร้างลิวอิสแล้วเปรียบเทียบกับอิเล็กตรอนของอะตอมขณะเป็นกลาง จำนวนอิเล็กตรอนนับ = $1/2$ (จำนวนอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะ) + (จำนวนอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว) เพื่อความเข้าใจง่ายขึ้นเราลองพิจารณาจากโครงสร้างข้างล่าง



จากผลการนับจำนวนอิเล็กตรอนพบว่า ออกซิเจนหมายเลข 1 มีค่าเท่ากับ 6 ซึ่งเท่ากับเวเลนซ์อิเล็กตรอนปกติของธาตุออกซิเจน ดังนั้นจึงไม่มีประจุฟอร์มัล ส่วนออกซิเจนหมายเลข 2 มีค่าเท่ากับ 7 ซึ่งมากกว่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนปกติของธาตุออกซิเจนอยู่ 1 ดังนั้นจึงมีประจุฟอร์มัลเป็น -1 ในทำนองเดียวกันออกซิเจนหมายเลข 3 มีค่าเท่ากับ 6 ซึ่งเท่ากับเวเลนซ์อิเล็กตรอนปกติของธาตุออกซิเจน ดังนั้นจึงไม่มีประจุฟอร์มัล และไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งน้อยกว่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนปกติของธาตุไนโตรเจนอยู่ 1 ดังนั้นจึงมีประจุฟอร์มัลเป็น +1 จากที่กล่าวมาอาจใช้สูตรการคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ประจุฟอร์มัล} = (\text{เลขที่หมู่ในตารางธาตุ}) - (\text{จำนวนพันธะที่สร้างขึ้น}) - (\text{จำนวนอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว})$$

ตัวอย่างเช่น ออกซิเจนหมายเลข 1 อยู่หมู่ที่ VIA (6A) และสร้างพันธะเดียวกับไฮโดรเจนทางซ้าย 1 พันธะ และกับไนโตรเจนทางขวาอีก 1 พันธะ รวมเป็น 2 พันธะ นอกจากนี้ออกซิเจนยังมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเท่ากับ 4 อิเล็กตรอน แทนค่าในสูตรจะได้

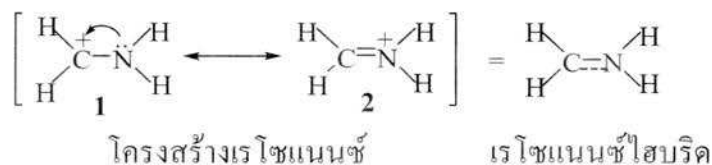
$$\begin{aligned}\text{ประจุฟอร์มัล} &= (6) - (2) - (4) \\ &= 0\end{aligned}$$

ซึ่งมีค่าตรงกับวิธีการคิดข้างบน จากเรื่องประจุฟอร์มัลที่กล่าวมาจะเห็นว่าเป็นสิ่งสำคัญมากและต้องอาศัยโครงสร้างของลิวอิสประกอบการพิจารณาด้วย

6. โครงสร้างเรโซแนนซ์

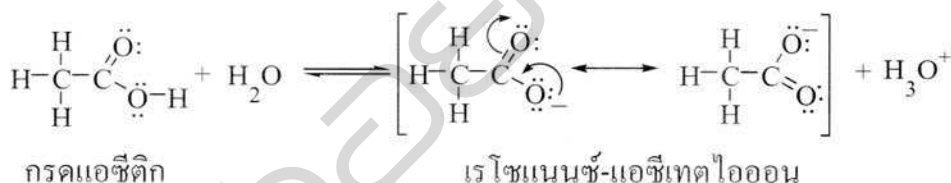
กรณีสารประกอบที่มีการเขียนสูตร โครงสร้างแบบลิวอิสได้มากกว่า 2 โครงสร้างขึ้นไปโดยโครงสร้างนั้นยังมีตำแหน่งของธาตุเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่อิเล็กตรอนบนอะตอม เรียกสูตรโครงสร้างที่ต่างกันนี้ว่า โครงสร้างเรโซแนนซ์ (resonance structure) และโครงสร้างรวมหรือที่แท้จริงของหลายๆ โครงสร้างนั้น

เรียกว่า เรโซแนนซ์ไฮบริด (resonance hybrid) เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น สมมติถ้าเรามี $[H_2CNH_2]^+$ ก็สามารถเขียนสูตรโครงสร้างได้ดังนี้

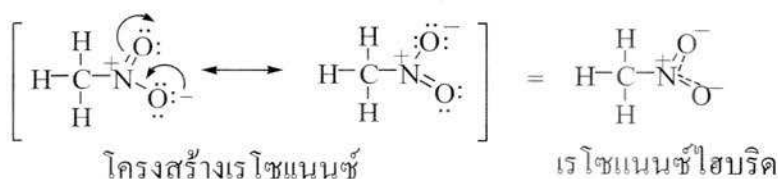


จากโครงสร้างจะพบว่า อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนจะเคลื่อน (moved) ไปที่ธาตุคาร์บอนประจุบวกเกิดเป็นพันธะคู่และธาตุคาร์บอนมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนครบกฎหุดแปด (โครงสร้าง 1) ส่วนโครงสร้าง 2 ทั้งอะตอมของคาร์บอนและไนโตรเจนมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนครบ 8 นอกจากนี้ยังเห็นอีกว่าประจุบวกจะเคลื่อนที่หรือมีการกระจายอยู่บนอะตอมธาตุทั้งสอง ทำให้ไอออนนี้เสถียรมากขึ้น จึงเรียกเหตุการณ์ลักษณะนี้ว่า การมีเสถียรภาพด้วยเรโซแนนซ์ (resonance-stabilized)

กรดแอซิดิกเมื่อมีการสูญเสียโปรตอนจะได้คาร์บอกซิเลตไอออน ซึ่งประจุลบจะไม่ประจำที่ (delocalized) โดยจะเคลื่อนไปที่อะตอมของออกซิเจนทั้งสองอย่างละครึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนไม่ใช่พันธะเดี่ยวหรือพันธะคู่อย่างเต็มที่ แต่เป็นพันธะหนึ่งครึ่ง (1.5) ดังแสดง



กรณีสารประกอบที่ไม่มีประจุก็สามารถเกิดเรโซแนนซ์ได้ เช่น ไนโตรมีเทน (CH_3NO_2) ซึ่งสามารถเขียนโครงสร้างแบบลิวอิสได้ อย่างไรก็ตามประจุฟอร์มัล +1 ก็อยู่บนอะตอมของไนโตรเจนและประจุลบจะมีการกระจายไปบนอะตอมของออกซิเจนดังโครงสร้างข้างล่าง



จากตัวอย่างที่เสนอข้างบนเป็นโครงสร้างเรโซแนนซ์ที่มีประจุบวกประจุลบ หรือประจุบวกและลบในโมเลกุลเดียวกัน ดังนั้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นจึงขอเสนอกฎของเรโซแนนซ์ไว้ดังนี้

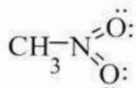
7. กฎของเรโซแนนซ์

7.1 ตำแหน่งอะตอม ของแต่ละโครงสร้างต้องเป็นตำแหน่งเดียวกันโดยที่อิเล็กตรอนจะกระจายไปตามโครงสร้างเรโซแนนซ์นั้น เช่น



จากสูตรโครงสร้างทั้ง 2 จะเห็นว่าอะตอมอยู่ตำแหน่งที่แตกต่างกันและเป็นสารคนละชนิดกัน จึงไม่เป็นโครงสร้างเรโซแนนซ์ซึ่งกันและกัน

7.2 สูตรโครงสร้างลิวอิส ต้องเป็นสูตรโครงสร้างแบบลิวอิสที่ถูกต้อง และธาตุในโครงสร้าง อยู่แถวที่ 2 ของตารางธาตุ ทั้งนี้ต้องมีการใช้อิเล็กตรอนไม่เกิน 8



จากโครงสร้างพบว่าไนโตรเจนมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 10 อิเล็กตรอน จึงไม่ใช่สูตรโครงสร้าง เรโซแนนซ์ที่ถูกต้อง

7.3 โครงสร้างเรโซแนนซ์ที่เสถียร ถ้ามีโครงสร้างเรโซแนนซ์ที่เหมือนกันและอะตอมเป็นไปตามกฎชุดแปดโครงสร้างที่เสถียรจะต้องไม่มีประจุบวกและลบหรือถ้ามีก็น้อยที่สุดดังแสดง



จะเห็นว่าโครงสร้างซ้ายมือจะเสถียรกว่าโครงสร้างขวามือเพราะไม่มีประจุชนิดตรงกันข้ามอยู่ด้วยกัน

7.4 ประจุบนโครงสร้างเรโซแนนซ์ ระหว่างโครงสร้างเรโซแนนซ์อะตอมมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเป็นไปตามกฎชุดแปดโครงสร้างที่เสถียรที่สุดคือ โครงสร้างที่ประจุลบอยู่บนอะตอม ที่มีค่าสภาพไฟฟ้าลบสูงกว่าโครงสร้างซ้ายมือข้างล่างประจุลบอยู่บนออกซิเจน

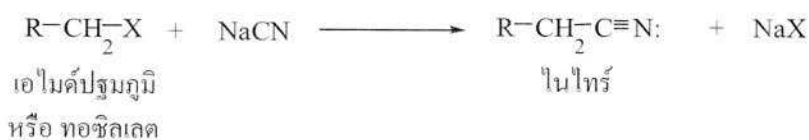


7.5 จำนวนอิเล็กตรอน โครงสร้างเรโซแนนซ์จะต้องมีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากันและประจุสุทธิเท่ากันด้วยเมื่อนับจำนวนอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะและอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของโครงสร้างซ้ายมือเท่ากับ 24 และประจุสุทธิเท่ากับ 0 ส่วนโครงสร้างขวามือมีจำนวนอิเล็กตรอนรวม 26 อิเล็กตรอน และประจุสุทธิคือ -2 ดังนั้นโครงสร้างทั้งสองไม่ใช่โครงสร้างเรโซแนนซ์ซึ่งกันและกัน ดังแสดง

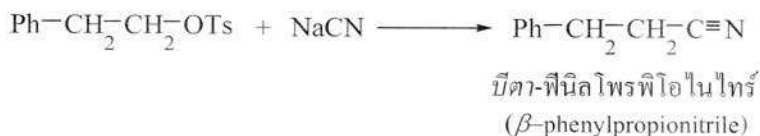


7.6 จำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยว โครงสร้างเรโซแนนซ์ต้องมีจำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยวเท่ากันซึ่งเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างทางซ้ายมืออิเล็กตรอนเดี่ยวไม่เท่ากับโครงสร้างทางขวา ดังนั้นทั้ง 2 โครงสร้างจึงไม่ใช่โครงสร้างเรโซแนนซ์กัน



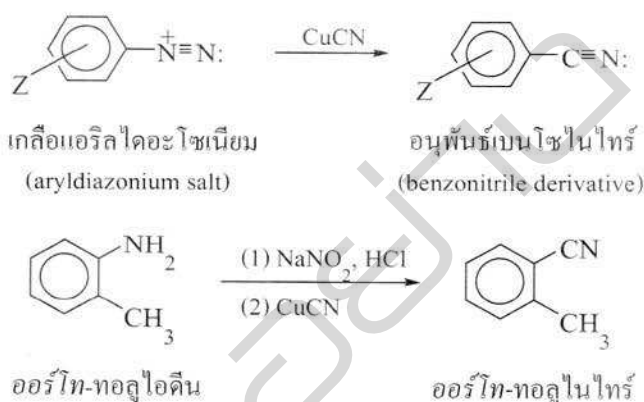


ตัวอย่างปฏิกิริยา



3. ปฏิบัติงานเช่นใดมาเรื่อยๆ

การเตรียมไนโตรสามารถใช้นำปฏิกิริยาแซนด์มายเออร์ได้โดยใช้เกลือแอริลไดอะโซเนียม เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับคิวปรัสไซยาไนด์ (CuCN) ทั้งนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ผ่านมา



โดยสรุปในการเตรียมไนโทรจะต้องเลือกวิธีการที่เหมาะสม ทั้งนี้หากต้องการรักษาจำนวนคาร์บอนของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ให้เท่ากัน จะต้องใช้วิธีกำจัดน้ำออกจากเอไมด์ แต่ถ้าต้องการเพิ่มจำนวนคาร์บอนที่สารตั้งต้นแล้วเกิดเป็นไนโทร จะต้องใช้วิธีการแทนที่ด้วยนิวคลีโอไฟล์ ส่วนการเตรียมเบนโซไนโทรจะต้องใช้วิธีของแซนด์มeyer เป็นต้น

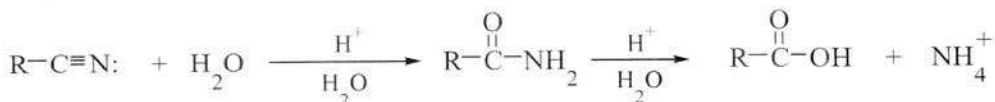
ปฏิกิริยาของไนไตร์

ถึงแม้ว่าไนไตรจะไม่มีหมู่คาร์บอนิลเหมือนกับอนุพันธักรดต่างๆ ไป การเกิดปฏิกิริยาของหมู่ไฮยาโนก็ยังคงคล้ายกับเอสเทอร์หรือเอไมด์ ในสารละลายกรดและเบสไนไตรจะถูกแยกสลายด้วยน้ำให้เป็นกรดและเอไมด์ หรือการเกิดปฏิกิริยากับกรีนาร์รีเอเจนต์ก็จะเหมือนกับเอสเทอร์และกรดคาร์บอกซิลิก ส่วนการถูกรีดิวซ์จะกลายเป็นเอมีนซึ่งเหมือนกับเอไมด์ เป็นต้น

1. ปฏิบัติการแยกสลายด้วยน้ำ

ในไทร์เมื่อถูกแยกสลายด้วยน้ำจะได้เอไมด์และกรดคาร์บอกซิลิก โดยการต้มให้ความร้อนแก่ในไทร์ในกรดหรือเบส ถ้าสถานะของปฏิกิริยาที่อ่อนปฏิกิริยาจะหยุดที่เอไมด์ แต่ถ้าสถานะที่เป็นกรดหรือเบสแก่จะได้กรดคาร์บอกซิลิกในที่สุด การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ลงไปจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น เพราะหมู่ $-OOH$ เป็นนิวคลีโอไฟล์ที่แรงกว่าหมู่ $-OH$ จึงเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซยาโนได้โดยง่าย

การแยกสลายด้วยน้ำในภาวะกรด

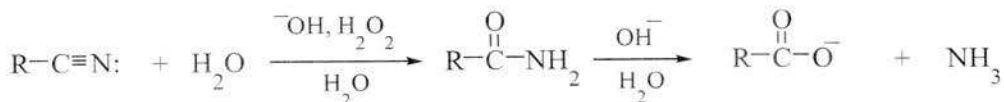


ไนไตร

เอไมด์ปฐมภูมิ

กรดคาร์บอกซิลิก

การแยกสลายด้วยน้ำในภาวะเบส

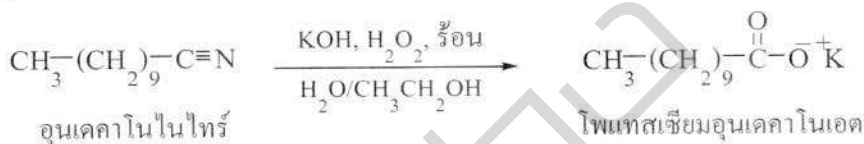


ไนไตร

เอไมด์ปฐมภูมิ

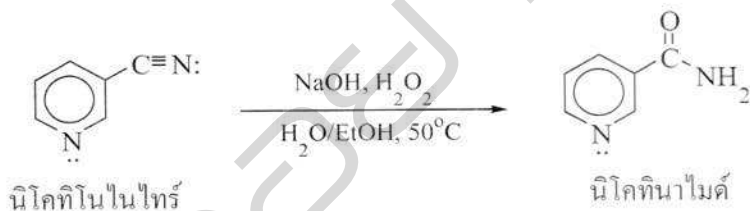
คาร์บอกซิเลต ไอออน

ตัวอย่างปฏิกิริยา



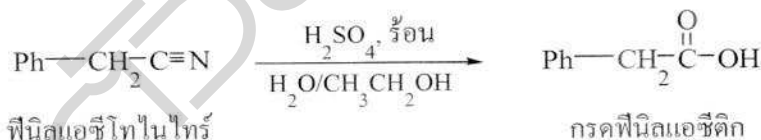
운데คาโนไนไตร

โพแทสเซียมฮันเดคาโนเอต



นิโคทีนไนไตร

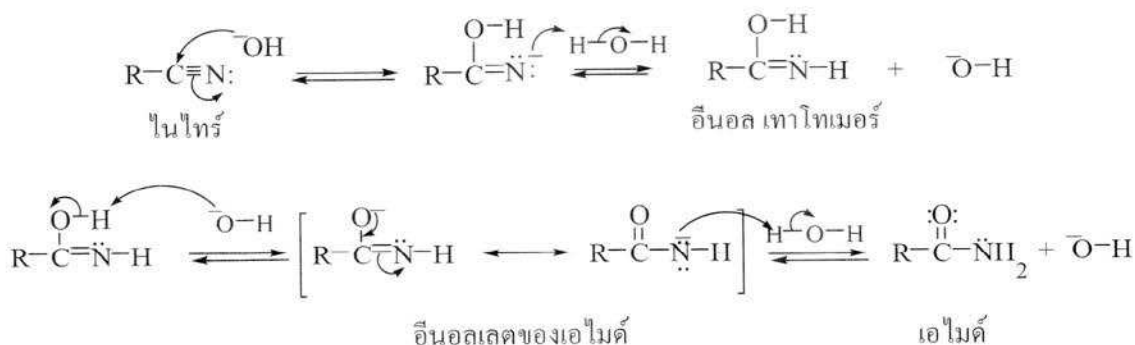
นิโคตินาไมด์



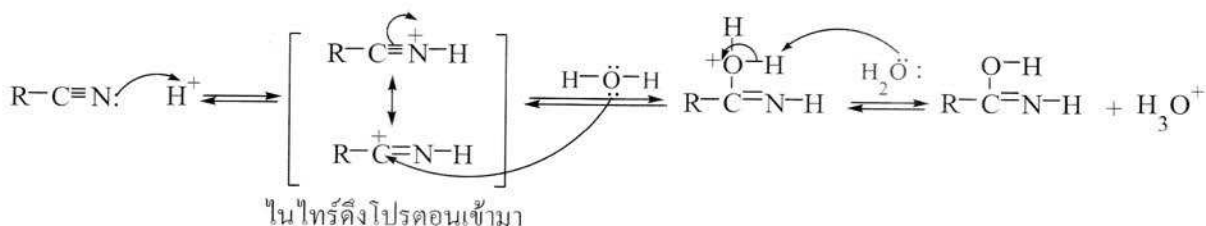
ฟีนิลเอซีโทไนไตร

กรดฟีนิลเอซิก

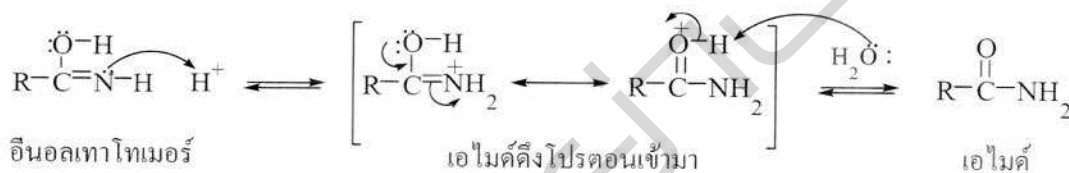
กลไกการเกิดปฏิกิริยาแยกสลายด้วยน้ำในภาวะเบส เริ่มแรกไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าชนคาร์บอนของหมู่ไซยาโนก่อน ประจุลบที่ไนโตรเจนดึงโปรตอนจากน้ำ ได้อินอลของเอไมด์ จากนั้นไฮดรอกไซด์เบสดึงโปรตอนของหมู่ไฮดรอกซิล ได้สารมัธยันตร์ที่เรียกว่า อินอลเลตเอไมด์ (enolate of amide) สารมัธยันตร์นี้เปลี่ยนรูปได้ โครงสร้างที่มีประจุลบบนไนโตรเจนจะดึงโปรตอนจากน้ำอีกครั้งหนึ่งได้เอไมด์ ดังสมการ



เอไมด์ที่เกิดขึ้นจะถูกแยกสลายด้วยน้ำต่อไป ซึ่งจะได้คาร์บอกซิลเลตและแอมโมเนีย ในทางตรงกันข้ามไนไตรจะถูกแยกสลายด้วยน้ำในภาวะกรด ซึ่งมีกลไกดังนี้ ไนโตรเจนของหมู่ไซยาโนดิงโปรตอน (protonated nitrile) การเกิดเช่นนี้เพื่อกระตุ้นให้หมู่ไซยาโนว่องไวต่อปฏิกิริยามากขึ้น ซึ่งคล้ายๆ กับหมู่คาร์บอนิล จากนั้นน้ำทำหน้าที่นิวคลีโอไฟล์เข้าชนคาร์บอนไซยาโนได้อินอลเอไมด์เป็นอินเทอร์มีเดียต



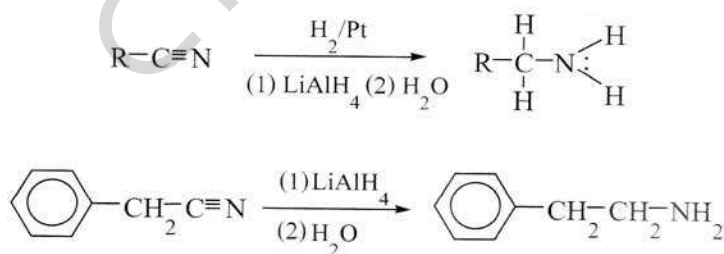
ต่อมาไนโตรเจนของอินอลเอไมด์ดิงโปรตอนให้กลายเป็นออกซิเนียมเอไมด์และเป็นเอไมด์ตามลำดับ



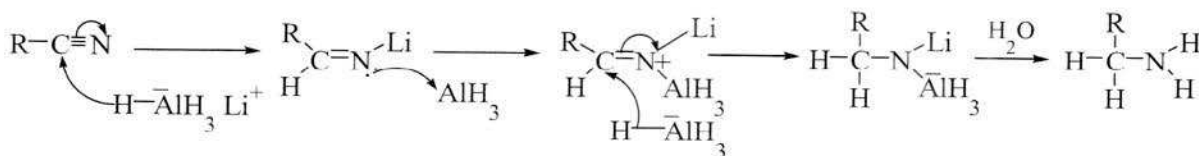
ปฏิกิริยายังไม่หยุดเท่านี้เอไมด์ที่ได้จะถูกแยกสลายด้วยน้ำเพื่อกลายเป็นกรดคาร์บอกซิลิกต่อไป

2. การรีดิวซ์ไนไตรเป็นเอมีนปฐมภูมิ

ลิเทียมอะลูมิเนียมไฮไดรด์ และแก๊สไฮโดรเจน/ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถรีดิวซ์ไนไตรเป็นเอมีนปฐมภูมิได้ การใช้ลิเทียมอะลูมิเนียมไฮไดรด์นิยมมากกว่าเพราะจะไม่รีดิวซ์พันธะคู่ระหว่างคาร์บอน

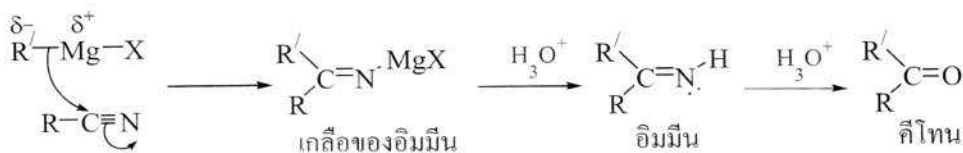


กลไกการรีดิวซ์ด้วยลิเทียมอะลูมิเนียมไฮไดรด์เป็นดังนี้ ไฮไดรด์จะเข้าชนไนไตร 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 ที่คาร์บอนของไซยาโน ไดลิเทียมอิมมิมและลิเทียมอะลูมิเนียมอิมมิมเนียมตามลำดับ จากนั้นไฮไดรด์เข้าชนลิเทียมอะลูมิเนียมอิมมิมเนียม ได้สารประกอบเชิงซ้อนอิมมิมที่มีลิเทียมและอะลูมิเนียมอยู่ด้วย สารนี้จะถูกแยกสลายด้วยน้ำเพื่อเกิดเป็นเอมีนในที่สุด ดังสมการ

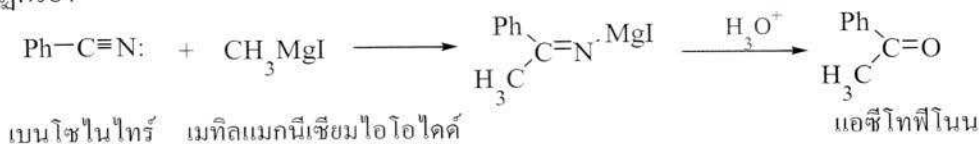


3. ปฏิกริยากับกริณารรีเอเจนต์และลิเทียมอินทรีย์

กริณารรีเอเจนต์เข้าชนหมู่ไซยาโนเพื่อเกิดเป็นเกลือโลหะแมกนีเซียมของอิมมิน อิมมินที่เกิดขึ้นถูกแยกสลายด้วยน้ำได้คีโตน ดังสมการ



ตัวอย่างปฏิกิริยา



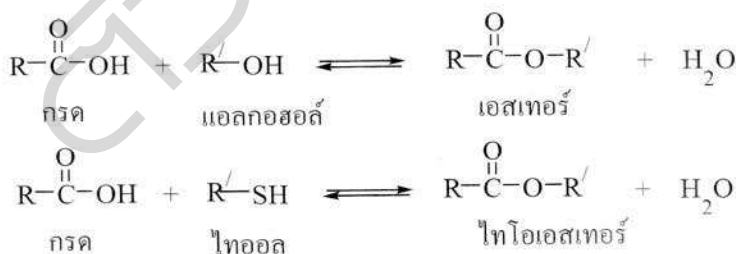
เบนไซไนไทร์ เมทิลแมกนีเซียมไอโอไดด์

อนุพันธอื่นๆ ของกรคาร์บอนซิก

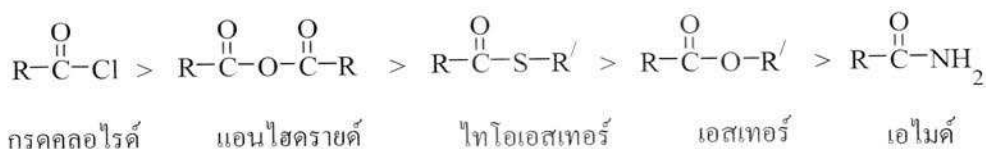
จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าอนุพันธของกรคาร์บอนซิกที่คุ้นเคยก็คือ เอสเทอร์ เอไมด์ ไนไทร์ กรดกลอไรด์ และแอนไฮดรายด์นั้น ยังมีอนุพันธของกรอื่นๆ อีก เช่น ไทโอเอสเทอร์ (thioester) คาร์บอเนตเอสเทอร์ (carbonate ester) ยูรีเทน (urethane)

1. ไทโอเอสเทอร์

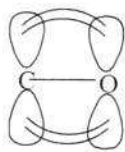
โดยปกติเอสเทอร์เป็นอนุพันธของกรคาร์บอนซิกเพราะเกิดจากการทำปฏิกิริยาของกรกับแอลกอฮอล์ ส่วนไทโอเอสเทอร์ได้มาจากการทำปฏิกิริยาของกรกับไทออล (thiol) บางครั้งจะเรียกว่าไทโอเอสเทอร์ (thiol ester) เพื่อเน้นความจริงที่ว่าเป็นอนุพันธของไทออลด้วย



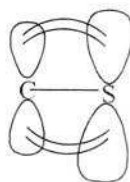
ไทโอเอสเทอร์ว่องไวต่อปฏิกิริยาการแทนที่หมู่แอซิดด้วยนิวคลีโอไฟล์มากกว่าเอสเทอร์ธรรมดา หากจะเรียงลำดับความว่องไวต่อปฏิกิริยาจะเป็นดังนี้



การเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้มีผลมาจากเหตุผล 2 ประการคือ 1) การเกิดเสถียรภาพของโมเลกุลเนื่องจากผลของเรโซแนนซ์ค่อนข้างน้อย 2) โครงสร้างเรโซแนนซ์แสดงให้เห็นว่าการหลอมซ้อนกันของ 2p-ออร์บิทัลบนคาร์บอนกับ 3p-ออร์บิทัลบนซัลเฟอร์เกิดขึ้นไม่ดี เนื่องจากออร์บิทัลทั้ง 2 มีขนาดแตกต่างกัน



C-O เหลื่อมซ้อนดี

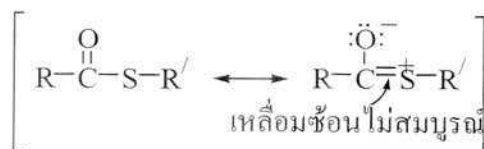


C-S เหลื่อมซ้อนไม่ดี



เอสเทอร์

การเกิดเรโซแนนซ์มีความสำคัญมาก

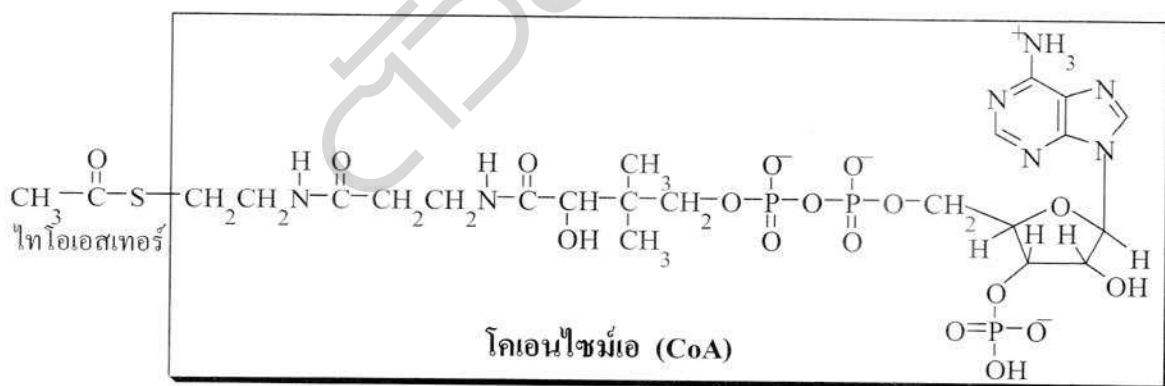


ไทโอเอสเทอร์

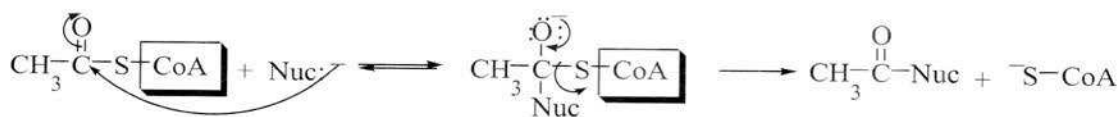
การเกิดเรโซแนนซ์ไม่ดี

นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างกันในส่วนของหมู่ผลออก เช่น หมู่แอลคิลซัลไฟด์ ไอออน (S-R) หลุดออกได้ดีกว่าหมู่แอลคอกไซด์ (O-R) ทั้งนี้เพราะซัลไฟด์มีความเป็นเบสน้อยกว่าแอลคอกไซด์นั่นเอง ซัลไฟด์มีขนาดอะตอมใหญ่กว่าออกซิเจน ดังนั้นการกระจายของประจุลบบนซัลเฟอร์จะไปได้ทั่วถึงมากกว่าบนออกซิเจน เมื่อหลุดออกมาเป็นเบสจึงไม่มีใครยอมให้อิเล็กตรอนออกจากตัวเองมากนัก

ระบบของสิ่งมีชีวิตจะใช้ไทโอเอสเทอร์เป็นแหล่งของหมู่แอซิล (acylating agent) เนื่องจากไทโอเอสเทอร์ไม่ถูกแยกสลายด้วยน้ำง่ายเหมือนกับกรดคลอไรด์และแอนไฮไดรด์ การแลกเปลี่ยนหมู่แอซิลในทางชีวเคมีอาศัยไทโอเอสเทอร์ของโคเอนไซม์ เอ (coenzyme A)



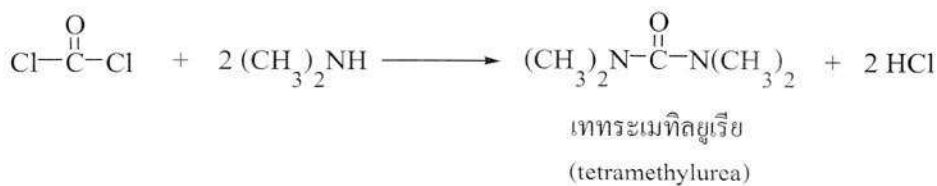
สมการข้างล่างแสดงให้เห็นถึงการเข้าทำปฏิกิริยาของนิวคลีโอไฟล์กับเอ็นไซม์แอซิติลโคเอนไซม์เอ ทำให้หมู่แอซิล (ในที่นี้คือแอซิติล, acetyl) เกาะอยู่กับนิวคลีโอไฟล์ได้ ดังสมการ



แอซิติลโคเอนไซม์เอ

อินเทอร์มีเดียตทรงสี่หน้า

สารผลิตภัณฑ์ที่มีหมู่แอซิล



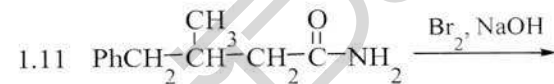
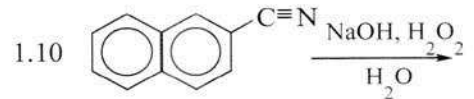
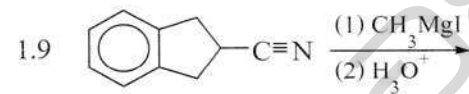
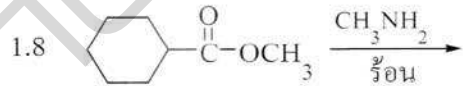
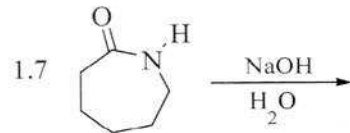
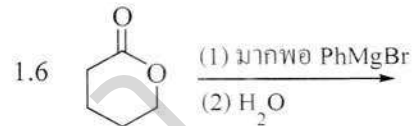
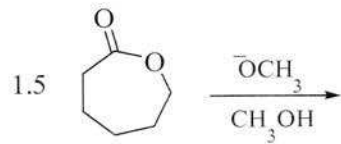
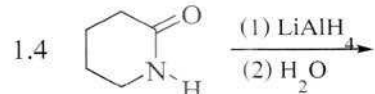
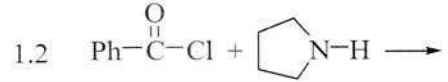
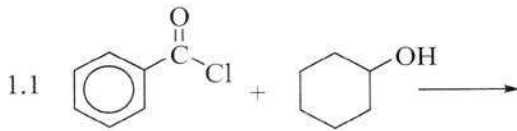
เคมีของอนุพันธ์กรดคาร์บอนิกเป็นที่น่าสนใจมากเพราะนำไปเตรียมสารสำคัญพวกพอลิเมอร์ เช่น พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate) และ พอลิยูรีเทน (polyurethane) เป็นต้น

สรุป

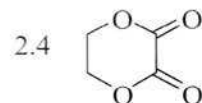
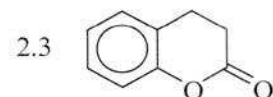
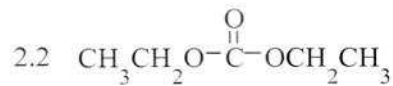
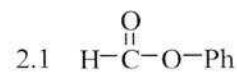
ปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์กับกรดไฮโดรคลอริกและแอนไฮไดรด์จะได้เอสเทอร์ ทั้งนี้กลไกเป็นแบบการเติม-การกำจัดออก ปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์กับกรดคาร์บอกซิลิกจะได้เอสเทอร์ด้วยเหมือนกัน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ฟิชเชอร์เอสเทอร์ฟิเคชัน นอกจากนี้หมู่แอลกอฮอล์ของเอสเทอร์สามารถเปลี่ยนไปเป็นแอลคิลอื่นได้โดยปฏิกิริยาของเอสเทอร์กับแอลกอฮอล์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ไดอะโซไมเทนเป็นรีเอเจนต์สำคัญในการเตรียมเอสเทอร์ได้โดยทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิก ปฏิกิริยาการแยกสลายของเอสเทอร์ภายใต้ภาวะกรดจะได้แอลกอฮอล์และกรดคาร์บอกซิลิก ในทางกลับกันถ้าเป็นภาวะเบสจะได้จะได้หมู่คาร์บอกซิเลตแทน เอสเทอร์ถูกทำให้เปลี่ยนเป็นเอไมด์ได้โดยปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำ การใช้เอสเทอร์เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมแอลกอฮอล์สังเคราะห์ โดยจะให้ทำปฏิกิริยากับกรีนาร์รีเอเจนต์และลิเทียมอินทรีรี อะลูมิเนียมไฮไดรด์สามารถรีดิวซ์เอสเทอร์เป็นแอลกอฮอล์ ทั้งนี้จะต้องเติมกรดลงไปเล็กน้อย สารตั้งต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์เอไมด์คือ กรดคลอไรด์ กรดแอนไฮไดรด์ สารทั้งสองเมื่อนำไปให้ความร้อนก็จะได้เอไมด์ นอกจากนี้การแยกสลายไนไทรด์ด้วยน้ำในภาวะกรดจะได้เอไมด์เช่นเดียวกัน ปฏิกิริยาแซนมาเยอร์จะใช้เตรียมเอโรแมติกไนไทรด์ การแยกสลายเอไมด์ด้วยน้ำในภาวะเบสจะได้คาร์บอกซิเลตและในกรดจะได้คาร์บอกซิลิกตามลำดับ อย่างไรก็ตามในภาวะกรดจะเกิดเกลือแอมโมเนียมขึ้นด้วย เอไมด์จะถูกรีดิวซ์ด้วยลิเทียมอะลูมิเนียมไฮไดรด์ซึ่งจะได้เอมีนเป็นผลิตภัณฑ์ แต่ถ้าเอไมด์มาคั่งน้ำออกไปจะได้ไนไทรด์ การเปลี่ยนเอไมด์เป็นเอมีนอาศัยโบรมีนในเบสเป็นรีเอเจนต์ ทั้งนี้ปฏิกิริยาจะมีการจัดตัวใหม่แบบฮอฟแมนขึ้น เอไมด์ที่เป็นวงเรียกว่า แล็กแทมซึ่งมีฤทธิ์ทางชีวภาพที่น่าสนใจ เช่น เพนนิซิลิน และเซฟาเลซิน เป็นต้น ไนไทรด์สังเคราะห์จากเอไมด์โดยการไล่น้ำออกไปหรือใช้หมู่ไฮยาไนด์แทนที่ในแอลคิลไฮไดรด์ก็ได้ นอกจากนี้ยังเตรียมจากปฏิกิริยาแซนมาเยอร์ ดังที่กล่าวแล้ว การแยกสลายไนไทรด์ด้วยน้ำในภาวะกรดจะได้เอไมด์ก่อนแล้วค่อยเปลี่ยนเป็นคาร์บอกซิลิก ส่วนในเบสจะหยุดที่หมู่คาร์บอกซิเลตเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย การรีดิวซ์ไนไทรด์จะได้เอมีนปฐมภูมิ ยังมีอนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิกอื่นๆ อีก เช่น ไทโอเอสเทอร์ คาร์บอเนตเอสเทอร์ ซึ่งสารเหล่านี้จะพอลิเมอร์ได้

คำถามท้ายบท

1. จงทำนายสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาต่อไปนี้



2. สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาซาฟอนิฟเคชันเป็นอะไร

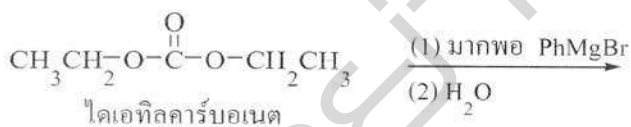


3. จงแสดงการสังเคราะห์สารต่อไปนี้ (บางปฏิกิริยาอาจมีหลายขั้นตอน)



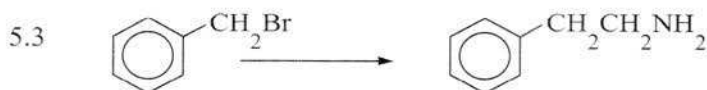
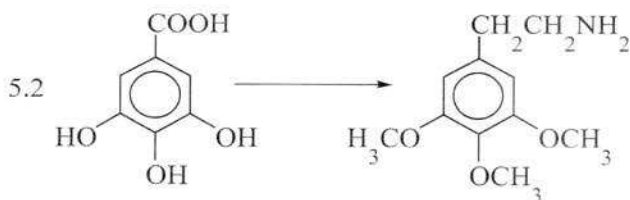
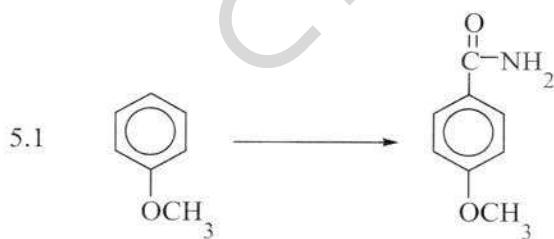
4. ปฏิกิริยาการเติมของกรีนาร์รีเอเจนต์ที่คาร์บอนเอสเทอร์ มีลักษณะคล้ายกับเอสเทอร์

4.1 จงทำนายสารผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ของปฏิกิริยาต่อไปนี้

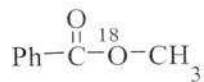


4.2 จงแสดงการสังเคราะห์ 3-เอทิล-3-เพนทานอลโดยใช้ ไดเอทิลคาร์บอเนต และเอทิลโบรไมด์

5. จงเติมรีเอเจนต์ที่เหมาะสมลงไปในส่วนต่อไปนี้



6. นกเคมดองการเตรยม เมทลเบนซอเอต และนโม่เลกุลมโอะคอมออกซเจนเปนไอซโทป 18 (^{18}O)



- 6.1 จงเพจนกลไกการเกิดปฏิกิริยาซาพอนนฟเคซันของเอสเทอร์น และหมี ^{18}O อยู่ด้วย
 6.2 อธิบายว่าทำไม ^{18}O จงเข้าไปอยู่ในโม่เลกุลของเอสเทอร์ได้

7. เมทล พรวา-นโตร์เบนซอเอต จะเกิดปฏิกิริยาซาพอนนฟเคซันเร็วกว่า เมทลเบนซอเอต

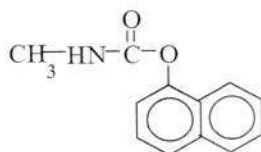
- 7.1 จงพิจารณากลไกการเกิดปฏิกิริยาแล้วอธิบายให้เห่นว่าทำไมอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารน จงเพ่มขึ้น
 7.2 จงคาดเดาว่า พรวา-เมทอกซีเบนซอเอต จะเกิดปฏิกิริยาซาพอนนฟเคซันเร็วหรือช้ากว่า เมทลเบนซอเอต

8. คาร์บาเมตเอสเทอร์หรือยูรีเทนสามารถเตรยมได้จากปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์กับไอโซไซยานต



- 8.1 จงเสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยา

- 8.2 มีโศกนาฏกรรมเกิดขึ้นที่เมือง ปูพาล (Bhopal) ประเทศอินเดียเมื่อมีสาร เมทลไอโซไซยานต ออกมาจากพืชเป็นจำนวนมากซึ่งสามารถนำมาผลิตยาฆ่าแมลงเซฟวินได้ จงแสดงการสังเคราะห์สารน



ยาฆ่าแมลงเซฟวิน

บรรณานุกรม

- ราชบัณฑิตยสถาน. (2546). ศัพท์วิทยาศาสตร์ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : อรุณการพิมพ์.
- Acheson, R.M. (1976). **An Introduction to the Chemistry of Heterocyclic Compounds** (3rd ed). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Carey, F.A. (1992). **Organic Chemistry** (2nd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Carey, F.A. , & Sundberg, R.J. (1992) **Advanced Organic Chemistry** Part B: Reaction and Synthesis (3rd ed.). New York, NY: Plenum.
- Ege, S.N. (1989). **Organic Chemistry** (2nd ed.). Lexington, MA: D.C. Heath and Company.
- Fox, M.A., & Whitesell, J.K. (1997). **Organic Chemistry** (2nd ed.). Sudbury, MA: Jones and Bartlett.
- Grossman, R.B. (1999). **The Art of Writing Reasonable Organic Reaction Mechanisms** (1st ed.). New York, NY: Springer-Verlag.
- Hart, H., Craine, L.E., & Hart, D.J. (1999). **Organic Chemistry** (10th ed.). Boston, NY: Houghton Mifflin.
- Hoffman, R.V. (1997). **Organic Chemistry: An Intermediate Text** (1st ed.). New York, NY: Oxford University.
- Joule, J.A., Mills, K. & Smith, G.F., (1995). **Heterocyclic Chemistry** (3rd ed). London: Chapman & Hall.
- Lewis, D.E. (1996). **Organic Chemistry : A Modern Perspective Preliminary Version** (1st ed). Dubuque, IA: Times Mirror.
- Larock, R.C. (1989). **Comprehensive Organic Transformations: A Guide to Functional Group Preparations** (1st ed.). New York, NY: VCH.
- Mann, J., Davidson, R.S., Hobbs, J.B., Banthorpe, D.V., & Harborne, J.B. (1994) **Natural Products : their chemistry and biological significance** (1st ed). Hong Kong: Longman Scientific & Technical
- Pine, S.H. , (1987). **Organic Chemistry** (5th ed). Singapore: McGraw-Hill.
- Schoffstall, A.M., Gaddis, B.A., Druelinger & Druelinger, M.L., (2000). **Microscale and Miniscale Organic Chemistry Laboratory Experiments** (1 st ed). New York, NY : McGraw-Hill.

- Smith, G.F., Joule, J.A., (1972). **Heterocyclic Chemistry** (3rd ed). New York, NY: Van Nostrand Reinhold.
- Smith, M.B. (1994). **Organic Synthesis** (2nd ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Shriner, R.L., Curtin, D.Y., Fuson, R.C., Morrill, T.C. (1980). **The Systematic Identification of Organic Compounds** (6th ed.). Singapore: John Wiley & Sons.
- Ternay, A.L. (1979). **Contemporary Organic Chemistry** (2nd ed.). Philadelphia, PA: W.B. Saunders.
- Torssell, Kurt B.G., (1997). **Natural Product Chemistry** (2nd ed). Sweden: Apotekarsocieteten.
- Wade, L.G. , (1987). **Organic Chemistry** (1st ed). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Williamson, K.L., (1989). **Marcroscale and Microscale Organic Experiments** (1 st ed). Massachusetts, MA: D.C. Health and Company.

เคมีอินทรีย์ขั้นต้น 1

วิชาเคมีอินทรีย์เป็นพื้นฐานเบื้องต้น ในการศึกษารายวิชาอื่นที่เกี่ยวข้อง ได้โดยตรง เช่น เคมีของผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ เคมีพอลิเมอร์ เคมีของสารประกอบโลหะอินทรีย์ และสเปกโทรสโกปีในอินทรีย์เคมี เป็นต้น มากไปกว่านั้นยังนำไปใช้ในการศึกษาวิชาเคมีอินทรีย์ขั้นสูงในระดับปริญญาโท-เอกด้วย สำหรับตำราเคมีอินทรีย์เล่มนี้มีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวกับไฮบริดเซชันของคาร์บอน สเตอริโอเคมี สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และอนุพันธ์ของไฮโดรคาร์บอนทุกชนิด ทั้งนี้ศึกษาระดับปริญญาตรีสายวิทยาศาสตร์ทุกสาขา สามารถนำไปใช้ในการศึกษาอ้างอิงได้ เนื้อหาดำราแบ่งออกเป็น 19 บท ทั้งนี้รายละเอียดภาพ โครงสร้าง ตาราง ต่างๆ ผู้เขียนได้เรียบเรียงมาจากตำราภาษาต่างประเทศ ซึ่งได้แสดงไว้ในบรรณานุกรมท้ายเล่ม



ดวงกมลพับลิชชิ่ง
นำเสนอหนังสือดี มีคุณค่า

e-book