



คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หลักการ และการคำนวณพื้นฐาน ทางวิศวกรรมเคมี

PRINCIPLES AND CALCULATIONS
IN CHEMICAL ENGINEERING

SE-ED

inspiration starts here

พศ.ศิริพันธ์ มุรรารัตน์ลักษณ์



SCHOOL
OF ENGINEERING
KMUTT

eBook
—STORE—

ชื่อหนังสือ

ภาษาไทย : หลักการและการคำนวณพื้นฐานทางวิศวกรรมเคมี

ภาษาอังกฤษ : Principles and Calculations in Chemical Engineering

รหัสวิชา : 01226011

ชื่อผู้แต่ง : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์

ประเมินคุณภาพตำราเรียน : ผ่าน

จัดพิมพ์ประเภท : หนังสือและตำราเรียน

พิมพ์ครั้งที่ : 1 เดือน กรกฎาคม 2567 จำนวน 100 เล่ม

รวมจำนวนการจัดพิมพ์ทั้งหมด : 100 เล่ม

ISBN : 978-616-338-199-6

จำนวนหน้า : 338 หน้า

จัดพิมพ์ประเภท : หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ (e-book)

พิมพ์ครั้งที่ : 1 เดือน ตุลาคม 2567

ISBN e-book : 978-616-338-204-7

วศ.สจล. e-Book : 003

จำนวนหน้า : 340 หน้า

ที่ปรึกษาฝ่ายผลิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนรรฆพล แสันทน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิณช ธนชัยโชคศิริกุล

นายชาคริต เทียนทอง

ประธานการจัดพิมพ์

น.ส.สุชาดา แดงอินทร์วัฒน์

ออกแบบรูปเล่ม

นายทนงศักดิ์ ใจชื่นแสน

จัดทำโดย : งานเทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอย ฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 02-329-8301 (ต่อ 234)

จัดจำหน่ายโดย : ซีเอ็ดบุ๊ค (SE-ED)

พิมพ์ที่ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย

88/8 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โครงการส่งเสริมการผลิตหนังสือและตำราเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติการพิมพ์

คำนำ

ตำราเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในรายวิชา “หลักการและการคำนวณพื้นฐานทางวิศวกรรมเคมี” (Principles and Calculations in Chemical Engineering) ซึ่งเป็นรายวิชาในชั้นปีที่ 2 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยอ้างอิงจาก ตำราหลัก คือ Elementary Principles of Chemical Processes ของ Felder, R.M. และ Rousseau, R.W. เนื่องจากเป็นตำราที่มีเนื้อหาน่าสนใจ มีการอธิบายละเอียดและเข้าใจง่ายและมีการยกตัวอย่างของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมเคมีเป็นตัวอย่างประกอบ เนื้อหาในตำราเล่มนี้มีรวมทั้งหมด 9 บท โดยเนื้อหาในบทที่ 1 และ 2 กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิชาวิศวกรรมเคมี การแปลงหน่วย ตัวแปรกระบวนการ ซึ่งจะพื้นฐานสำหรับการคำนวณทั้งหมด บทที่ 3 ถึง 5 กล่าวถึงการคำนวณดุลมวล ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการ แพลนภูมิสายงาน การดุลมวลสำหรับระบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี ทั้งกระบวนการหน่วยเดียวและกระบวนการหลายหน่วย การดุลมวลสำหรับระบบที่มีปฏิกิริยาเคมี บทที่ 6 กล่าวถึงระบบวัฏภาคเดียว และระบบพหุวัฏภาค เป็นการสรุปเนื้อหาเพื่อให้ผู้อ่านสามารถใช้ข้อมูลสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบของสารต่าง ๆ ในแต่ละวัฏภาค ทั้งสารบริสุทธิ์และสารผสม เพื่อการดุลมวลพื้นฐานสำหรับกระบวนการแยกสาร โดยบทที่ 7 ถึง 8 เป็นการคำนวณดุลพลังงาน โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็นสองส่วน บทที่ 7 จะกล่าวสรุปเนื้อหาเกี่ยวกับอุณหพลศาสตร์ และการนำไปใช้ในการคำนวณดุลพลังงานสำหรับระบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี บทที่ 8 จะกล่าวสรุปเนื้อหาเกี่ยวกับอุณหเคมี และการนำไปใช้ในการคำนวณดุลพลังงานสำหรับระบบที่มีปฏิกิริยาเคมี และบทที่ 9 จะเป็นการนำความรู้จากบทที่ 1 ถึง 8 มาประยุกต์ใช้ในการดุลมวลและดุลพลังงานในงานวิศวกรรมเคมี สำหรับระบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี และระบบที่มีปฏิกิริยาเคมี พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างส่วนหนึ่งที่มีการนำความรู้จากการคำนวณพื้นฐานทางวิศวกรรมเคมี ไปใช้สำหรับการเรียนหรือการวิจัยในชั้นปีที่สูงขึ้น ผู้อ่านสามารถศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมได้จากหนังสือสำหรับอ่านประกอบ ซึ่งผู้เขียนได้สรุปรายละเอียดไว้ที่ส่วนท้ายของแต่ละบท นอกจากนี้ ผู้เขียนได้ทำสื่อประกอบการสอนในรูปแบบสไลด์วีดิทัศน์และบันทึกไว้ที่ Youtube Channel - PrinCal ChemEng เพื่อให้ผู้อ่านสามารถใช้ประกอบการเรียนเพิ่มเติมได้

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ตำราเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน ขอให้ผู้อ่านตระหนักว่าการที่ผู้อ่านจะเรียนรู้และสามารถนำความรู้ไปใช้ได้ดี ผู้อ่านควรที่จะเรียนรู้กระบวนการคิดแก้ปัญหาด้วยตัวเอง โดยการทำแบบฝึกหัดอย่างสม่ำเสมอ สำหรับข้อผิดพลาดที่มีอยู่ในตำรา ผู้เขียนขอน้อมรับเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงในโอกาสต่อไป

ผศ.ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์

ตุลาคม 2567

สารบัญ

คำนำ	I
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
สารบัญตัวอย่าง	XI
บทที่ 1 บทนำ	
(Introduction)	1
1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิชาชีพวิศวกรรมเคมี (Introduction to Chemical Engineering Profession).....	1
1.2 วิศวกรเคมี (Chemical Engineer)	1
1.3 หน่วยและมิติ (Units and Dimensions).....	8
1.4 การแปลงหน่วย (Conversion of Units).....	12
1.5 การคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม (Numerical Calculation for Solving Engineering Problems).....	17
แบบฝึกหัดท้ายบท.....	22
บทที่ 2 ตัวแปรกระบวนการ	
(Process Variables)	25
2.1 มวล โมล และปริมาตร (Mass, Mole and Volume).....	25
2.2 อัตราการไหล (Flow Rate).....	31
2.3 ส่วนประกอบทางเคมี (Chemical Composition).....	35
2.4 ความดัน (Pressure)	43
2.5 อุณหภูมิ (Temperature)	51
แบบฝึกหัดท้ายบท.....	54
บทที่ 3 ดุลมวล	
(Material Balances).....	59
3.1 กระบวนการ (Processes)	59
3.2 ดุลมวลสำหรับระบบที่ภาวะคงตัวและไม่คงตัว (Material balances for steady state and unsteady state systems)	70
3.3 การคำนวณดุลมวล (Material Balance Calculations)	74
แบบฝึกหัดท้ายบท.....	87

บทที่ 4	ดุลมวลสำหรับระบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี	
	(Material Balances for Systems without Chemical Reactions).....	93
4.1	ดุลมวลสำหรับกระบวนการหน่วยเดียว	
	(Material Balances on Single-Unit Process)	93
4.2	ดุลมวลสำหรับกระบวนการหลายหน่วย	
	(Material Balances on Multiple-Unit Processes)	106
4.3	การรีไซเคิล การเบี่ยง การเป่าทิ้ง และการเติม	
	(Recycle, Bypass, Purge and Makeup)	112
	แบบฝึกหัดท้ายบท.....	125
บทที่ 5	ดุลมวลสำหรับระบบที่มีปฏิกิริยาเคมี	
	(Material Balances for Systems with Chemical Reactions).....	135
5.1	ปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometry)	135
5.2	ดุลมวลสำหรับระบบที่มีปฏิกิริยาเคมี	
	(Material Balances for Systems with Chemical Reactions).....	151
5.3	ดุลมวลในงานวิศวกรรมเคมี (Material Balances in Chemical Process).....	157
	แบบฝึกหัดท้ายบท.....	164
บทที่ 6	ระบบวัฏภาคเดียว และระบบพหุวัฏภาค	
	(Single-phase and Multiphase Systems)	169
6.1	แผนภาพวัฏภาคของสารส่วนประกอบเดียว	
	(Single-Component Phase Diagrams).....	170
6.2	แก๊ส (Gases)	172
6.3	ความดันไอ (Vapor Pressures)	181
6.4	ความดันไอของสารละลาย (Vapor Pressures of Solutions)	185
	แบบฝึกหัดท้ายบท.....	190
บทที่ 7	ดุลพลังงาน - อุณหพลศาสตร์	
	(Energy Balances - Thermodynamics)	195
7.1	พลังงาน (Energy)	195
7.2	ความจุความร้อน (Heat Capacities)	200
7.3	ตารางข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ (Tables of Thermodynamic Data)	204
7.4	การคำนวณเอนทัลปี (Enthalpy Calculations)	212
7.5	ดุลพลังงานสำหรับระบบปิดและระบบเปิด	
	(Energy Balances for Closed and Open Systems)	219

7.6	ดุลพลังงานสำหรับระบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี (Energy Balances for Systems without Chemical Reactions)	226
	แบบฝึกหัดท้ายบท.....	239
บทที่ 8 ดุลพลังงาน - อุณหเคมี (Energy Balances - Thermochemistry)..... 247		
8.1	ความร้อนปฏิกิริยาเคมี (Heats of Reaction)	247
8.2	กฎของเฮสส์ (Hess's Law)	251
8.3	ความร้อนปฏิกิริยา (Heats of Formation)	253
8.4	ความร้อนจากการเผาไหม้ (Heats of Combustion)	255
8.5	ดุลพลังงานสำหรับระบบที่มีปฏิกิริยาเคมี (Energy Balances for Systems with Chemical Reactions)	257
8.6	เชื้อเพลิงและการเผาไหม้ (Fuels and Combustion)	267
	แบบฝึกหัดท้ายบท.....	269
บทที่ 9 ดุลมวลและดุลพลังงานในงานวิศวกรรมเคมี (Material and Energy Balances in Chemical Engineering) 273		
9.1	ดุลมวลและดุลพลังงานสำหรับระบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี (Material and Energy Balances for Systems without Chemical Reactions)	273
9.2	ดุลมวลและดุลพลังงานสำหรับระบบที่มีปฏิกิริยาเคมี (Material and Energy Balances for Systems with Chemical Reactions)	278
9.3	ดุลมวลและดุลพลังงานในภาวะไม่คงตัว (Material and Energy Balances in Unsteady State)	280
9.4	การประยุกต์ใช้การคำนวณพื้นฐานในงานวิศวกรรมเคมี (Application of Basic Calculations in Chemical Engineering)	283
	แบบฝึกหัดท้ายบท.....	288
	ภาคผนวก.....	291
	เอกสารอ้างอิง	315
	ดัชนี.....	317

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	วิศวกรรมเคมีเปลี่ยนผลิตภัณฑ์จากห้องปฏิบัติการเคมีสู่การผลิตระดับอุตสาหกรรม.....	2
รูปที่ 1.2	นักเคมีในห้องปฏิบัติการเคมี.....	2
รูปที่ 1.3	วิศวกรเคมีในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรม	3
รูปที่ 1.4	ห้องประชุมงานและพื้นที่ทำงานของวิศวกรเคมี.....	3
รูปที่ 1.5	ความสัมพันธ์ระหว่างวิศวกรเคมีกับนักวิทยาศาสตร์อื่น ๆ	3
รูปที่ 1.6	ความละเอียดของเครื่องวัด	17
รูปที่ 2.1	การไหลของของไหลภายในท่อ	31
รูปที่ 2.2	อุปกรณ์วัดอัตราการไหล	32
รูปที่ 2.3	ความดันของของไหลภายในถัง.....	43
รูปที่ 2.4	ความดันพื้นฐานของคอลัมน์บรรจุของไหล.....	47
รูปที่ 2.5	แมนอมิเตอร์	48
รูปที่ 2.6	สเกลอุณหภูมิ.....	51
รูปที่ 3.1	การให้ความร้อนกับของไหลในท่อด้วยน้ำร้อน.....	60
รูปที่ 3.2	การเปลี่ยนแปลงระดับของน้ำ.....	61
รูปที่ 3.3	การไหลของของไหลในท่ออุตสาหกรรม.....	63
รูปที่ 3.4	การผสม	63
รูปที่ 3.5	การกรอง.....	63
รูปที่ 3.6	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ.....	64
รูปที่ 3.7	เครื่องควบแน่น.....	64
รูปที่ 3.8	เครื่องแยกแบบแฟลช	64
รูปที่ 3.9	การเพิ่มความชื้น	65
รูปที่ 3.10	การลดความชื้นโดยการลดอุณหภูมิของอากาศ.....	65
รูปที่ 3.11	การทำแห้ง.....	65
รูปที่ 3.12	การระเหย.....	66
รูปที่ 3.13	การตกผลึก	66
รูปที่ 3.14	หอกลิ้น	66
รูปที่ 3.15	การดูดซึมแก๊ส	67
รูปที่ 3.16	การสกัดด้วยของเหลว.....	67
รูปที่ 3.17	การชะล้าง	67
รูปที่ 3.18	การดูดซับ	68

รูปที่ 3.19 แผนภาพรูปบล็อกของกระบวนการผลิตเบนซีน	68
รูปที่ 3.20 แผนภาพการไหลของกระบวนการผลิตเบนซีน	69
รูปที่ 3.21 แผนภาพกระบวนการและเครื่องมือวัด (P&ID) ของหอกกลั่น	69
รูปที่ 3.22 แผนภาพการไหลสำหรับกระบวนการเผาไหม้	74
รูปที่ 3.23 (ก) การขยายมาตราส่วนขึ้น (ข) การลดมาตราส่วนลง	77
รูปที่ 3.24 การขยายมาตราส่วนของแผนภาพการไหล	78
รูปที่ 4.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมี	112
รูปที่ 4.2 แผนภาพการไหลของกระบวนการที่มีการรีไซเคิล	112
รูปที่ 4.3 แผนภาพการไหลของกระบวนการที่มีการเป่าแห้ง	120
รูปที่ 4.4 แผนภาพการไหลของกระบวนการที่มีการเป่าทิ้ง	123
รูปที่ 4.5 แผนภาพการไหลของกระบวนการที่มีการเติม	124
รูปที่ 5.1 แผนภาพการไหลของกระบวนการดีไฮโดรจีเนชันของอีเทน	151
รูปที่ 6.1 แผนภาพวัฏภาค	170
รูปที่ 6.2 แผนภาพวัฏภาคของน้ำ	171
รูปที่ 6.3 แผนภาพสภาพอัดได้ (compressibility chart) ที่ภาวะความดันสูง	179
รูปที่ 6.4 แผนภาพสภาพอัดได้ (compressibility chart) ที่ภาวะความดันปานกลาง	181
รูปที่ 6.5 แผนภาพค็อก	183
รูปที่ 7.1 งานของความดัน-ปริมาตร	197
รูปที่ 7.2 สมบัติที่ขึ้นกับปริมาณและสมบัติที่ไม่ขึ้นกับปริมาณ	198
รูปที่ 7.3 ข้อมูลของ $\hat{H}$ ที่มีภาวะอ้างอิงต่างกัน	208
รูปที่ 7.4 กระบวนการให้ความร้อนแก่น้ำเมื่อความดันคงที่	209
รูปที่ 7.5 เส้นทางสมมุติของกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของฟีนอล	213
รูปที่ 7.6 ระบบปิดและระบบเปิด	219
รูปที่ 7.7 พลังงานที่เกี่ยวข้องกับระบบปิด	220
รูปที่ 7.8 พลังงานที่เกี่ยวข้องกับระบบเปิด	222
รูปที่ 8.1 เส้นทางของกระบวนการ (process path)	258

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมิติและหน่วย	9
ตารางที่ 1.2 หน่วยในระบบเอสไอและระบบอังกฤษ	11
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างของหน่วยปฏิบัติการและกระบวนการทางเคมี	62
ตารางที่ 7.1 แหล่งข้อมูลเอนทัลปี	204
ตารางที่ 8.1 ค่าความร้อนรวมของเชื้อเพลิงทั่วไป	268
ตารางที่ A.1 Conversion Factors	292
ตารางที่ B.1 Selected Physical Property Data	294
ตารางที่ B.2 Heat Capacities	298
ตารางที่ B.3 Vapor Pressure of Water	300
ตารางที่ B.4 Antoine Equation Constants	302
ตารางที่ B.5 Properties of Saturated Steam: Temperature Table	304
ตารางที่ B.6 Properties of Saturated Steam: Pressure Table	306
ตารางที่ B.7 Properties of Superheated Steam	310
ตารางที่ B.8 Specific Enthalpies of Selected Gases: SI Units	312
ตารางที่ B.9 Specific Enthalpies of Selected Gases: American Engineering Units	312
ตารางที่ B.10 Integral Heats of Solution and Heats of Mixing at 25°C	313

SE-ED
inspiration starts here

สารบัญตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ 1.1 หน่วยและมิติ	12
ตัวอย่างที่ 1.2 การแปลงหน่วย.....	14
ตัวอย่างที่ 1.3 มวลและน้ำหนัก.....	15
ตัวอย่างที่ 1.4 การแปลงหน่วยในงานวิศวกรรมเคมี	16
ตัวอย่างที่ 1.5 ความสอดคล้องของมิติ.....	19
ตัวอย่างที่ 1.6 การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น	21
ตัวอย่างที่ 2.1 ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ	27
ตัวอย่างที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของของเหลว	28
ตัวอย่างที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะของสารผสม.....	28
ตัวอย่างที่ 2.4 น้ำหนักโมเลกุล	30
ตัวอย่างที่ 2.5 การแปลงระหว่างมวลและโมล.....	30
ตัวอย่างที่ 2.6 อัตราการไหลของของเหลว	32
ตัวอย่างที่ 2.7 อัตราการไหลของของเหลวผสม	33
ตัวอย่างที่ 2.8 อัตราการไหลของแก๊ส.....	34
ตัวอย่างที่ 2.9 เศษส่วนมวล เศษส่วนโมล ร้อยละเชิงมวล ร้อยละเชิงโมล	36
ตัวอย่างที่ 2.10 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	37
ตัวอย่างที่ 2.11 การแปลงเศษส่วนมวลเป็นเศษส่วนโมล.....	38
ตัวอย่างที่ 2.12 การแปลงเศษส่วนโมลเป็นเศษส่วนมวล.....	38
ตัวอย่างที่ 2.13 เศษส่วนมวล เศษส่วนโมล น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย.....	39
ตัวอย่างที่ 2.14 การแปลงความเข้มข้น	40
ตัวอย่างที่ 2.15 การแปลงความเข้มข้นและอัตราการไหล	41
ตัวอย่างที่ 2.16 การแปลงความดัน.....	44
ตัวอย่างที่ 2.17 ความดันในหน่วยแรงต่อพื้นที่ ความดันในหน่วยเฮก.....	45
ตัวอย่างที่ 2.18 ความดันสัมบูรณ์ ความดันเกจ.....	46
ตัวอย่างที่ 2.19 บารอมิเตอร์.....	47
ตัวอย่างที่ 2.20 ความดันไฮโดรสแตติก	48
ตัวอย่างที่ 2.21 แมนอมิเตอร์.....	49
ตัวอย่างที่ 2.22 ความดันลด.....	50
ตัวอย่างที่ 2.23 การแปลงระดับอุณหภูมิ.....	52
ตัวอย่างที่ 2.24 การแปลงอุณหภูมิ	52

ตัวอย่างที่ 3.1	ดุลมวล	70
ตัวอย่างที่ 3.2	ดุลมวลสำหรับกระบวนการผลิตเป็นรุ่น	71
ตัวอย่างที่ 3.3	ดุลมวลสำหรับกระบวนการต่อเนื่อง	72
ตัวอย่างที่ 3.4	ดุลมวลสำหรับกระบวนการกึ่งต่อเนื่อง	73
ตัวอย่างที่ 3.5	แผนภาพการไหลและการดุลมวล	75
ตัวอย่างที่ 3.6	การขยายมาตราส่วนของแผนภาพการไหล	78
ตัวอย่างที่ 3.7	ฐานการคำนวณ	80
ตัวอย่างที่ 3.8	ฐานการคำนวณและแฟกเตอร์การขยายมาตราส่วน	81
ตัวอย่างที่ 3.9	การวิเคราะห์ห้องเสาเสรี	83
ตัวอย่างที่ 3.10	การคำนวณดุลมวล	85
ตัวอย่างที่ 4.1	ดุลมวลของเครื่องผสม	93
ตัวอย่างที่ 4.2	ดุลมวลของเครื่องควบแน่น	94
ตัวอย่างที่ 4.3	ดุลมวลของเครื่องแยกแบบแฟลช	95
ตัวอย่างที่ 4.4	ดุลมวลของเครื่องลดความชื้น	96
ตัวอย่างที่ 4.5	ดุลมวลของเครื่องอบแห้ง	96
ตัวอย่างที่ 4.6	ดุลมวลของเครื่องระเหย	97
ตัวอย่างที่ 4.7	ดุลมวลของเครื่องระเหยและเครื่องตกผลึก	98
ตัวอย่างที่ 4.8	ดุลมวลของเครื่องตกผลึก	99
ตัวอย่างที่ 4.9	ดุลมวลของหอกลิ้น	100
ตัวอย่างที่ 4.10	ดุลมวลของเครื่องหีบ	101
ตัวอย่างที่ 4.11	ดุลมวลของหอดูดซึมแก๊ส	102
ตัวอย่างที่ 4.12	ดุลมวลของเครื่องสกัดด้วยของเหลว	102
ตัวอย่างที่ 4.13	ดุลมวลของเครื่องชะล้าง	103
ตัวอย่างที่ 4.14	ดุลมวลของเครื่องดูดซับ	105
ตัวอย่างที่ 4.15	แผนภาพสายงานของกระบวนการหลายหน่วย	106
ตัวอย่างที่ 4.16	การวิเคราะห์ห้องเสาเสรี สำหรับกระบวนการหลายหน่วย	107
ตัวอย่างที่ 4.17	ดุลมวลของระบบทำแห้ง	109
ตัวอย่างที่ 4.18	ดุลมวลของเครื่องระเหยแบบ 3 ขั้นตอน	110
ตัวอย่างที่ 4.19	ดุลมวลของหอดูดซึมและหอกลิ้น	111
ตัวอย่างที่ 4.20	ดุลมวลของหอกลิ้นที่มีการรีไซเคิล	113
ตัวอย่างที่ 4.21	ดุลมวลสำหรับกระบวนการผลิตยาที่มีการรีไซเคิล	114
ตัวอย่างที่ 4.22	ดุลมวลสำหรับกระบวนการปรับอากาศที่มีการรีไซเคิล	115

ตัวอย่างที่ 4.23	คุณมวลสำหรับกระบวนการตกผลึกที่มีการรีไซเคิล.....	117
ตัวอย่างที่ 4.24	คุณมวลสำหรับกระบวนการทำแห้งที่มีการรีไซเคิล	118
ตัวอย่างที่ 4.25	คุณมวลสำหรับกระบวนการผลิตน้ำส้มเข้มข้นที่มีการเป่า.....	120
ตัวอย่างที่ 4.26	คุณมวลสำหรับกระบวนการแยกแก๊สที่มีการเป่า.....	122
ตัวอย่างที่ 4.27	คุณมวลสำหรับระบบไอน้ำในโรงงานที่มีการเป่าทิ้ง.....	123
ตัวอย่างที่ 5.1	ปริมาณสัมพัทธ์.....	136
ตัวอย่างที่ 5.2	ปฏิกิริยาสaponification.....	137
ตัวอย่างที่ 5.3	การผลิตน้ำแข็งแห้ง.....	137
ตัวอย่างที่ 5.4	สารตั้งต้นจำกัดและสารตั้งต้นส่วนเกิน	138
ตัวอย่างที่ 5.5	ร้อยละส่วนเกิน (% excess).....	139
ตัวอย่างที่ 5.6	ร้อยละส่วนเกิน (% excess).....	139
ตัวอย่างที่ 5.7	ร้อยละการเปลี่ยน (% conversion).....	141
ตัวอย่างที่ 5.8	ร้อยละส่วนเกินและร้อยละการเปลี่ยน	142
ตัวอย่างที่ 5.9	ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ออกซิเจนจากอากาศเป็นสารตั้งต้น.....	143
ตัวอย่างที่ 5.10	ร้อยละผลได้และค่าการเลือก (% yield and selectivity)	146
ตัวอย่างที่ 5.11	ขนาดของปฏิกิริยากรณ์ปฏิกิริยาเคมี.....	148
ตัวอย่างที่ 5.12	ค่าสมดุลของปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาแบบผันกลับได้	150
ตัวอย่างที่ 5.13	ขนาดของปฏิกิริยา ดุลอะตอม และดุลโมเลกุล สำหรับปฏิกิริยาเดี่ยว.....	153
ตัวอย่างที่ 5.14	ขนาดของปฏิกิริยา ดุลอะตอม และดุลโมเลกุล สำหรับพหุปฏิกิริยา	154
ตัวอย่างที่ 5.15	ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของอีเทน.....	157
ตัวอย่างที่ 5.16	ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของมีเทน.....	159
ตัวอย่างที่ 5.17	การผลิตคลอโรเบนซีน	160
ตัวอย่างที่ 5.18	พหุปฏิกิริยา	161
ตัวอย่างที่ 5.19	คุณมวลสำหรับกระบวนการหลายหน่วยที่มีปฏิกิริยาเคมี.....	162
ตัวอย่างที่ 6.1	แก๊สอุดมคติ.....	174
ตัวอย่างที่ 6.2	สมการภาวะแฟกเตอร์สภาพอัดได้.....	178
ตัวอย่างที่ 6.3	กฎของเคย์	180
ตัวอย่างที่ 6.4	ความดันไอ.....	184
ตัวอย่างที่ 6.5	ความดันไอและความดันย่อย	184
ตัวอย่างที่ 6.6	กฎของราอูลต์	187
ตัวอย่างที่ 6.7	กฎของเฮนรี	189
ตัวอย่างที่ 7.1	พลังงานจลน์และพลังงานศักย์.....	198

ตัวอย่างที่ 7.2 งานของความดัน-ปริมาตร	199
ตัวอย่างที่ 7.3 เอนทัลปี	200
ตัวอย่างที่ 7.4 ความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่	202
ตัวอย่างที่ 7.5 ความจุความร้อนที่ความดันคงที่	203
ตัวอย่างที่ 7.6 ความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของแก๊สผสม	203
ตัวอย่างที่ 7.7 ตารางไอน้ำ	210
ตัวอย่างที่ 7.8 เอนทัลปีของการเปลี่ยนสถานะ	215
ตัวอย่างที่ 7.9 เอนทัลปีของการเปลี่ยนอุณหภูมิ	216
ตัวอย่างที่ 7.10 เอนทัลปีของการละลาย	218
ตัวอย่างที่ 7.11 ดุลพลังงานสำหรับระบบปิด	221
ตัวอย่างที่ 7.12 ดุลพลังงานสำหรับระบบเปิด	224
ตัวอย่างที่ 7.13 ดุลพลังงานของกังหันไอน้ำ	227
ตัวอย่างที่ 7.14 ดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ	228
ตัวอย่างที่ 7.15 ดุลพลังงานของกระบวนการที่มีสารสองส่วนประกอบ	229
ตัวอย่างที่ 7.16 ดุลพลังงานของเครื่องทำความร้อน	230
ตัวอย่างที่ 7.17 ดุลพลังงานของเครื่องควบแน่น	232
ตัวอย่างที่ 7.18 ดุลพลังงานของเครื่องอุ่นแก๊ส	234
ตัวอย่างที่ 7.19 ดุลพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	235
ตัวอย่างที่ 7.20 ดุลพลังงานของกระบวนการผลิตกรดไฮโดรคลอริก	236
ตัวอย่างที่ 8.1 ความร้อนมาตรฐานของปฏิกิริยาเคมี	249
ตัวอย่างที่ 8.2 กฎของเฮสส์	252
ตัวอย่างที่ 8.3 ความร้อนมาตรฐานของปฏิกิริยา	254
ตัวอย่างที่ 8.4 ความร้อนมาตรฐานของปฏิกิริยาและการเปลี่ยนวัฏภาค	255
ตัวอย่างที่ 8.5 ความร้อนมาตรฐานจากการเผาไหม้	256
ตัวอย่างที่ 8.6 ดุลพลังงานสำหรับกระบวนการเผาไหม้โปรเพน	259
ตัวอย่างที่ 8.7 ดุลพลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์	262
ตัวอย่างที่ 8.8 ดุลพลังงานสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของมีเทน	264
ตัวอย่างที่ 8.9 ดุลพลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแอเดียแบติก	265
ตัวอย่างที่ 9.1 ดุลมวลและดุลพลังงานของเครื่องผสม	273
ตัวอย่างที่ 9.2 ดุลมวลและดุลพลังงานของเครื่องระเหย	274
ตัวอย่างที่ 9.3 ดุลมวลของเครื่องเพิ่มความชื้นให้อากาศ	276
ตัวอย่างที่ 9.4 ดุลมวลของหอดูดซึมแก๊ส SO ₂	277

ตัวอย่างที่ 9.5 คุณสมบัติและคุณลักษณะสำหรับปฏิสัมพันธ์ที่ไม่สมบูรณ์	278
ตัวอย่างที่ 9.6 คุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์แบบกังหันต่อเนื่อง	281
ตัวอย่างที่ 9.7 คุณสมบัติของกังหัน	282
ตัวอย่างที่ 9.8 การคำนวณสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนในอากาศ	283
ตัวอย่างที่ 9.9 การคำนวณสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนและการผสม	284
ตัวอย่างที่ 9.10 การนำคอนเดนเซอร์กลับมาใช้	285
ตัวอย่างที่ 9.11 คุณสมบัติและคุณลักษณะของเครื่องลดความชื้นแบบเบดบรรจุ	286

SE-ED
inspiration starts here

บทที่ 1

บทนำ

(Introduction)

1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิชาชีพวิศวกรรมเคมี (Introduction to Chemical Engineering Profession)

วิศวกรรมเคมีเรียนอะไร วิศวกรรมเคมีแตกต่างกับนักเคมีอย่างไร เรียนจบวิศวกรรมเคมีทำงานอะไร เป็นคำถามที่บุคคลทั่วไป นักเรียนระดับมัธยมปลาย หรือแม้แต่ นักศึกษาระดับมหาวิทยาลัย มักจะตั้งคำถามและหาคำตอบอยู่เสมอ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าคำตอบที่ผู้เขียนได้รวบรวมและเรียบเรียงไว้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน เพื่อเป็นข้อมูลในการประกอบการตัดสินใจ การเลือกเรียน หรือการวางแผนการเรียนที่เหมาะสม

วิศวกรรมเคมีเรียนเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบหรือผลผลิต ตลอดจนกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม ซึ่งเน้นที่ความเข้าใจกลไกการทำงานของแต่ละหน่วยย่อยในกระบวนการผลิต รวมทั้งภาพรวมของกระบวนการทั้งหมด และสามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีสำหรับงานในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ผู้ที่จะเข้าศึกษาในสาขาวิชานี้ควรเป็นผู้ที่ใฝ่รู้และรักในการแก้ปัญหา

ความรู้ที่ใช้ในการแก้ปัญหางานด้านวิศวกรรมเคมี ได้แก่ หลักการคำนวณ ทฤษฎีต่าง ๆ ทางวิศวกรรมที่เกี่ยวกับการควบคุมการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ งานของวิศวกรเคมีจะเกี่ยวข้องกับการเลือก การออกแบบ การวางแผน และการควบคุมกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรม ซึ่งจำเป็นต้องประยุกต์ใช้ความรู้ด้านวิศวกรรม คณิตศาสตร์ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา รวมถึงนำความรู้ทางเศรษฐศาสตร์มาประกอบกันเป็นรูปธรรม เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจ การจัดการปัญหาต่าง ๆ

1.2 วิศวกรเคมี (Chemical Engineer)

กระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมในระยะแรก ๆ เน้นที่การผลิตผลิตภัณฑ์ทางเคมี ด้วยเหตุนี้ อาจเรียก “วิศวกรเคมี” เป็น “วิศวกรกระบวนการ (process engineer)” ในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมเริ่มตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ (raw material) และนำวัตถุดิบมาผ่านกระบวนการเพื่อเปลี่ยนสถานะ ส่วนผสม หรือสมบัติของสารนั้น ให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ (product) ที่มีคุณภาพตามต้องการ เป็นการเพิ่มคุณค่าทางเศรษฐศาสตร์ รวมถึงพัฒนาการใช้วัสดุและพลังงานในวิถีทางที่ประหยัด ปลอดภัย และอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน กระบวนการเหล่านี้ประกอบด้วย อนุกรมของ “หน่วยปฏิบัติการ (unit operations)” ที่อาศัยหลักการและทฤษฎีทางฟิสิกส์ เช่น การกลั่น (distillation) การสกัด (extraction) การตกผลึก (crystallization) การทำแห้ง (drying) การกรอง (filtration) และการบด (grinding) เป็นต้น นอกจากการออกแบบและควบคุมกระบวนการในโรงงาน วิศวกรเคมีจะเกี่ยวข้องกับการประเมินความปลอดภัย ระบบการวัดและควบคุม การออกแบบก่อสร้าง กฎหมายสิ่งแวดล้อม และการนำความรู้ทางด้านคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์มาประยุกต์ใช้ในการกระบวนการทางเคมี อีกด้วย

1.2.1 วิศวกรเคมีและนักเคมี (Chemical Engineer and Chemist)

“วิศวกรเคมี” และ “นักเคมี” สองสาขาอาชีพที่มีความคล้ายกันของการเรียนในรายวิชาพื้นฐาน ได้แก่ วิชาพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ ฟิสิกส์ เคมีทั่วไป เคมีอินทรีย์ เคมีวิเคราะห์ เคมีฟิสิกส์ และชีวเคมี แต่ในรายวิชาชั้นสูง ทั้งสองสาขานี้จะศึกษาวิชาที่แตกต่างกันมาก โดย “วิศวกรเคมี” ซึ่งศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมเคมี จะต้องเรียนความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรม และเรียนเพิ่มเติมเกี่ยวกับกฎและทฤษฎีต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ เพื่อที่จะสามารถออกแบบ ดำเนินการและควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม รวมไปถึงสามารถพัฒนากระบวนการทางเคมีหรือฟิสิกส์เพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ส่วน “นักเคมี” ซึ่งศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตร์เคมี จะเรียนเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ การวิเคราะห์ การเตรียมสาร เพื่อที่จะสามารถทำงานในห้องปฏิบัติการ (laboratory) ในฐานะนักวิจัย นักพัฒนาเกี่ยวกับปฏิกิริยาต่าง ๆ เมื่อนักเคมีได้ทำการค้นพบวิธีการที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูงขึ้นแล้ว วิศวกรเคมีจะนำวิธีการที่ได้มาใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบกระบวนการเพื่อขยายกำลังการผลิตสู่ระดับอุตสาหกรรมที่มีขนาดของกำลังการผลิตที่มากกว่ากำลังการผลิตในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 1.1

นักเคมีจะทำงานในลักษณะงานค้นคว้าหรือปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเน้นที่การปรับปรุงในส่วนของปฏิกิริยาเคมีด้วยเครื่องมือทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงลักษณะของงานในรูปที่ 1.2 สำหรับกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัตถุดิบไปเป็นผลิตภัณฑ์จำนวนมาก จะออกแบบโดยใช้พื้นฐานความรู้ทางฟิสิกส์เท่านั้น และไม่เกี่ยวข้อง กับปฏิกิริยาเคมีใด ๆ เช่น การกลั่น นี่จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ นักเคมีมีความรู้เพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับทฤษฎีและการปฏิบัติของงานด้านวิศวกรรมเคมี



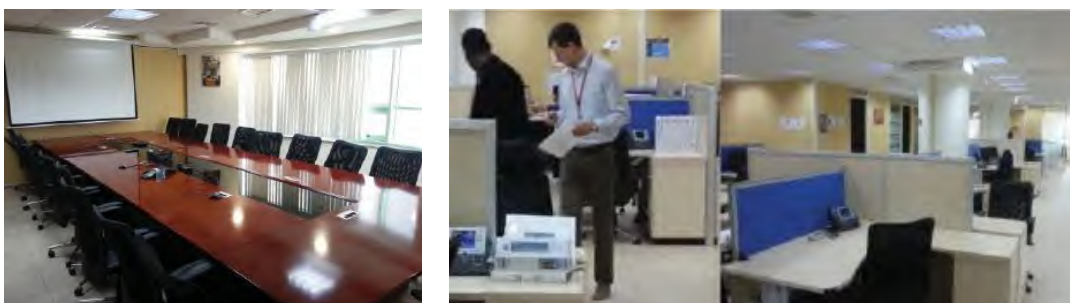
รูปที่ 1.1 วิศวกรรมเคมีเปลี่ยนผลิตภัณฑ์จากห้องปฏิบัติการเคมีสู่การผลิตระดับอุตสาหกรรม
(ที่มา: Nnaji, 2019)



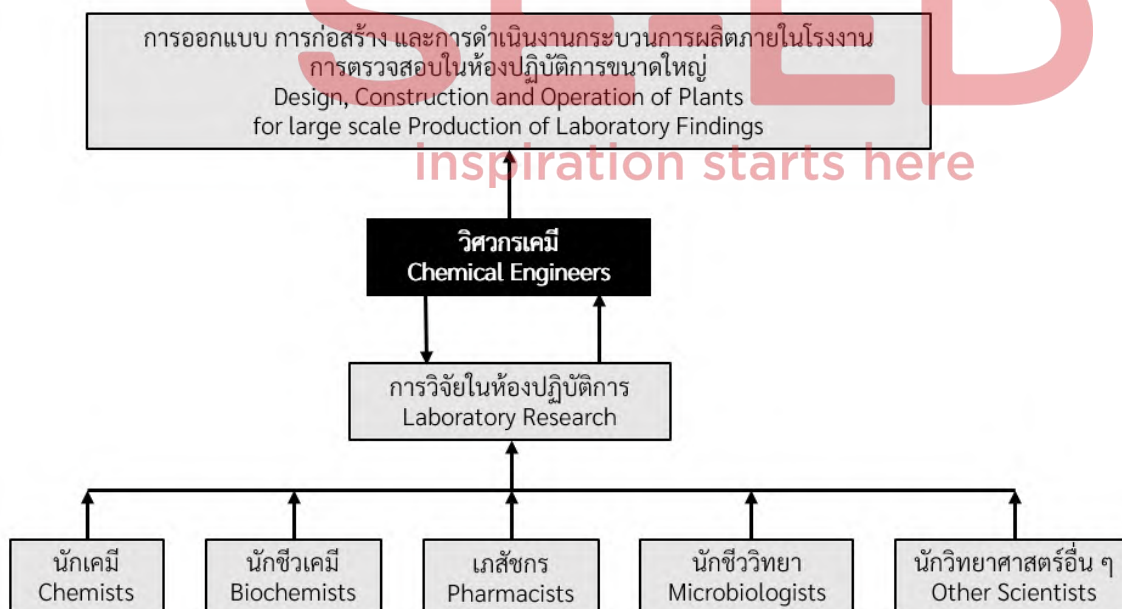
รูปที่ 1.2 นักเคมีในห้องปฏิบัติการเคมี
(ที่มา: Nnaji, 2019)



รูปที่ 1.3 วิศวกรเคมีในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรม
(ที่มา: Nnaji, 2019)



รูปที่ 1.4 ห้องประชุมงานและพื้นที่ทำงานของวิศวกรเคมี
(ที่มา: Nnaji, 2019)



รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างวิศวกรเคมีกับนักวิทยาศาสตร์อื่น ๆ
(ที่มา: ปรับปรุงจาก Nnaji, 2019)

1.2.2 งานของวิศวกรเคมี (Jobs of Chemical Engineers)

ในโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อต้องการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่ง จะต้องเริ่มจากฝ่ายวิจัยและพัฒนา (research and development) ซึ่งจะทำหน้าที่ค้นคว้าและทดสอบภายในห้องทดลอง เพื่อหากระบวนการผลิตที่ประหยัดที่สุด ได้ผลิตผลสูงสุด และอัตราเร็วดีที่สุด จากนั้นจะเป็นงานของวิศวกรโครงการ (project engineer หรือ process discipline) จะทำหน้าที่ออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิต ออกแบบการก่อสร้างโรงงาน รวมไปถึงการเตรียมความพร้อมของโรงงานก่อนเริ่มการผลิตจริง (commissioning) วิศวกรโครงการควรจะเป็นผู้ที่มีประสบการณ์ในงานด้านอื่น ๆ มาก่อน เนื่องจากผู้ออกแบบกระบวนการผลิตจะต้องนำความรู้เชิงลึก มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ รวมไปถึงศึกษาการทำดุลมวลและดุลพลังงานเพื่อนำมาคำนวณหาต้นทุนการผลิต เนื่องจากราคาผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ขึ้นกับปริมาณของวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการผลิต การประหยัดพลังงานจะทำให้ช่วยลดต้นทุนการผลิต เมื่อวิศวกรโครงการทำการออกแบบกระบวนการผลิตเสร็จแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนของการดูแลงานก่อสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งนอกจากการเลือกชนิดของวัสดุก่อสร้างที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น มีความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนได้ดี วิศวกรจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่สำคัญต่อการสร้างโรงงานเช่นกัน ปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ การเลือกตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานจะต้องพิจารณาทั้งด้านแหล่งของวัตถุดิบ พลังงาน การขนส่ง การตลาด ค่าที่ดิน ค่าแรงงาน การกำจัดของเสียจากโรงงาน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อต้นทุนการผลิตทั้งสิ้น

ในการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามความต้องการนั้น วิศวกรการผลิต (production engineer หรือ process engineer) จะทำหน้าที่วางแผน ควบคุม ดูแล และปรับปรุงแก้ไขปัญหาในกระบวนการผลิต ปัจจุบันกระบวนการผลิตได้มีการนำระบบการควบคุมอัตโนมัติมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวแปรกระบวนการที่ต้องควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และ อัตราการไหล เป็นต้น วิศวกรควบคุมกระบวนการ (process control) จะมีหน้าที่ในเลือกอุปกรณ์และออกแบบระบบที่ใช้สำหรับควบคุมกระบวนการผลิต รวมไปถึงจนถึงควบคุมการใช้งานของอุปกรณ์ในระหว่างการผลิต อุปกรณ์วัดและควบคุมมีหน้าที่ต่าง ๆ กัน ได้แก่ วัดข้อมูลทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ควบคุมการทำงานให้ได้ตามที่ต้องการ จัดบันทึกค่าต่าง ๆ ประมวลผลและทำการควบคุมแบบอัตโนมัติ การใช้อุปกรณ์วัดและควบคุมแบบอัตโนมัติให้ผลที่ดีกว่าการควบคุมด้วยคน เนื่องจาก ทำงานได้เร็ว ถูกต้อง และ เชื่อถือได้ดีกว่า

ในการผลิตสินค้าให้ได้คุณภาพที่ดี มีคุณภาพสม่ำเสมอ วิศวกรควบคุมคุณภาพการผลิต (quality control engineer) จะต้องทำการวิเคราะห์และกำหนดมาตรฐาน เริ่มตั้งแต่ตรวจสอบคุณลักษณะของวัตถุดิบที่ส่งเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละขั้นตอน และผลิตภัณฑ์สุดท้าย ว่ามีคุณลักษณะตรงตามที่กำหนดหรือไม่ หากไม่ได้คุณลักษณะตรงตามที่ต้องการก็ต้องทำการปรับปรุงกระบวนการ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพก็ต้องทิ้งไปหรือนำกลับไปเข้ากระบวนการผลิตใหม่ หรือจำหน่ายในราคาถูกลง

ในด้านความปลอดภัย วิศวกรความปลอดภัย (safety engineer) จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยภายในโรงงาน โดยเริ่มตั้งแต่การวางแผนและมาตรฐานของความปลอดภัยในโรงงาน การวางแผนผังโรงงานเพื่อลดอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้น โดยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ ในกระบวนการที่มีความเสี่ยง การใช้เครื่องมือให้ถูกลักษณะของงาน การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับงานและสถานที่ การตรวจตราอุปกรณ์ควบคุม เช่น อุปกรณ์วัดความดัน และวาล์วควบคุมต่าง ๆ อยู่เสมอ วิศวกร

ความปลอดภัยจะเป็นผู้รับผิดชอบงานด้านการป้องกันอุบัติเหตุในโรงงาน อาจจะมีการจัดอบรมแก่บุคลากรในโรงงาน เพื่อให้ความรู้เรื่องการป้องกันอุบัติเหตุ การป้องกันเหตุเพลิงไหม้ หรือความปลอดภัยในโรงงาน

อุตสาหกรรมเคมีส่วนใหญ่จะมีของเสียเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต วิศวกรเคมีสิ่งแวดล้อม (environmental chemical engineer) จะทำหน้าที่ออกแบบ ควบคุม และดูแลการดำเนินการของหน่วยปฏิบัติการสำหรับการบำบัดของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ส่งผลให้สามารถลดปริมาณการปลดปล่อยของเสียจากกระบวนการผลิต วิศวกรจะต้องควบคุมการทำงานของระบบบำบัดของเสีย ให้สามารถลดปริมาณการปลดปล่อยของเสียซึ่งเป็นมลพิษสิ่งแวดล้อม โดยมีค่าการปลดปล่อยมลพิษไม่เกินค่ามาตรฐานอ้างอิงตามกฎหมายและข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อม

เมื่อได้สินค้าพร้อมจำหน่ายแล้ว จะต้องทำการเลือกภาชนะบรรจุให้เหมาะสมกับสินค้าที่ผลิต โดยคำนึงถึงราคา ความเหมาะสมของประเภทวัสดุที่ใช้ ความสะดวก ความปลอดภัย ความแข็งแรง และการขนส่ง เช่น การใช้ภาชนะที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกจะช่วยลดค่าใช้จ่ายภาชนะ การใช้ขนาดภาชนะที่เหมาะสมจะช่วยลดค่าขนส่ง การเลือกการขนส่งที่เหมาะสมจะช่วยลดต้นทุน งานส่วนนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิศวกรด้านการตลาด (marketing engineer) การวางแผนการตลาดทำให้ลูกค้ามีความพึงพอใจในการใช้สินค้าหรือการรับบริการ ซึ่งเป็นการส่งเสริมคุณภาพสินค้าอีกทางหนึ่งด้วย นอกจากนี้สำหรับวิศวกรเคมีที่ของานบริการ อาจทำงานด้านการขาย (sales engineer) หรืองานบริการเทคนิค (technical service) ซึ่งจำเป็นต้องใช้พื้นฐานความรู้ทางวิศวกรรมเคมีในการให้บริการลูกค้า

เมื่อวิศวกรเคมีมีประสบการณ์การทำงานที่มากขึ้น อาจเรียนต่อเพิ่มเติมในศาสตร์อื่น ๆ เช่น การเงิน การลงทุน การตลาด การบริหาร หรือเศรษฐศาสตร์ และเปลี่ยนไปทำงานด้านงานบริหาร (management) งานวางแผน (planning) งานวิเคราะห์การลงทุน (business development) หรือเป็นเจ้าของธุรกิจ (business owner) นอกจากนี้ที่กล่าวมาทั้งหมด วิศวกรเคมีสามารถเลือกทำงานด้านการศึกษา (education) ในฐานะอาจารย์มหาวิทยาลัย เพื่อช่วยพัฒนาประเทศ โดยการเป็นผู้ขับเคลื่อนหลักที่สำคัญในกระบวนการสร้างบัณฑิตให้สอดคล้องกับความต้องการของอุตสาหกรรม รูปที่ 1.3 และ รูปที่ 1.4 แสดงถึงลักษณะการทำงานของวิศวกรเคมี ซึ่งมีรูปแบบการทำงานทั้งในและนอกสำนักงาน

นอกจากนักเคมี นักวิทยาศาสตร์สาขาอื่น ๆ เช่น นักชีวเคมี เกษษกร นักชีววิทยา จะทำการค้นคว้า และวิจัยในศาสตร์เฉพาะด้านในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory research) วิศวกรเคมีจะทำหน้าที่ในการนำองค์ความรู้จากห้องปฏิบัติการ สู่ออกแบบ (design) การก่อสร้าง (construction) และการดำเนินงานกระบวนการผลิตในระดับโรงงานอุตสาหกรรม (operation of plants) ดังแสดงในรูปที่ 1.5

1.2.3 อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรเคมี (Industries Related to Chemical Engineers)

งานของวิศวกรเคมีไม่ได้มีขอบเขตจำกัดอยู่เพียงแค่งานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเท่านั้น แต่ครอบคลุมงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมแทบทุกประเภท ความต้องการวิศวกรเคมีในงานอุตสาหกรรมสำหรับประเทศที่พัฒนาแล้วมีอยู่ในระดับสูง งานของวิศวกรเคมีได้ขยายออกไปอย่างกว้างขวางและได้เข้าไปมีส่วนในอุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

อุตสาหกรรมเชื้อเพลิง เช่น การกลั่นน้ำมัน ปิโตรเลียม ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ

อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น สี ย้อม การผลิตกรด โซดาไฟ

อุตสาหกรรมพอลิเมอร์ เช่น พลาสติก ยาง โฟม รถยนต์

อุตสาหกรรมเครื่องอุปโภค เช่น สบู่ ผงซักฟอก แชมพู สบู่ ยาสีฟัน

อุตสาหกรรมอาหารและยา เช่น น้ำมันพืช น้ำตาล สุรา เบียร์ ยา

อุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเส้นใย

อุตสาหกรรมโลหะ

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า

หน่วยงานที่ดูแลด้านสิ่งแวดล้อม

1.2.4 โอกาสงานในอนาคตของวิศวกรเคมี (Future Opportunities for Chemical Engineers)

หลายทศวรรษที่ผ่านมา วิศวกรเคมีมีส่วนร่วมอย่างมากในการปรับปรุงคุณภาพชีวิตของมนุษย์ด้วยการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น พอลิเมอร์ กระดาษ สี ย้อม ยา พลาสติก ปุ๋ย อาหาร ปิโตรเคมี ฯลฯ และในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า เทคโนโลยีชีวภาพ เกษตรกรรม นาโนเทคโนโลยี วิศวกรรมโมเลกุล อุปกรณ์ทางการแพทย์ และวัสดุชีวภาพมีแนวโน้มที่จะขยายตัวอย่างมาก วิศวกรเคมีจะมีส่วนสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมชีวการแพทย์ การบำบัดของเสียด้วยกระบวนการทางกายภาพและชีวภาพ พันธุวิศวกรรม นาโนเทคโนโลยี การจำลองระดับโมเลกุล การดัดแปลงพันธุกรรม กระบวนการแยกโปรตีน และการสกัดของไหลวิกฤตยิ่งยวด วิศวกรรมโมเลกุลเป็นส่วนสำคัญของการวิจัยทางเกษตรกรรมและวัสดุศาสตร์ การศึกษาแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์จะช่วยวิศวกรเคมีในการวิเคราะห์กระบวนการดังกล่าว

สำหรับงานด้านสิ่งแวดล้อม วิศวกรเคมีกำลังมุ่งเน้นไปที่การใช้วัตถุดิบทางเลือก เช่น ชีวมวลและขยะสังเคราะห์เพื่อผลิตสารเคมีและพลังงาน เป้าหมายคือการลดการปลดปล่อยคาร์บอน และบางครั้งกระบวนการคาร์บอนต่ำนี้เรียกว่า "เคมีสีเขียว" หรือกระบวนการที่ยั่งยืน

1.2.5 ปัญหาในงานวิศวกรรมเคมี (Problems in Chemical Engineering)

นักเคมีในแผนกวิจัยและพัฒนาของบริษัทแห่งหนึ่ง พบว่า เมื่อทำการผสมสารตั้งต้นสองชนิดในสัดส่วนที่แน่นอนที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีมูลค่าสูงกว่าสารตั้งต้นทั้งสองอย่างมาก บริษัทพิจารณาให้ทำการผลิตผลผลิตโดยใช้กระบวนการตามปฏิริยานี้ ในฐานะวิศวกรเคมี มีอะไรบ้างที่ต้องคิดและแก้ปัญหา เพื่อการออกแบบและดำเนินการกระบวนการผลิตนี้

(ที่มา: ปรับปรุงจาก Felder และ Rousseau, 2005, Ex.1)

1. ควรใช้เครื่องปฏิกรณ์ (reactor) แบบใด? ใช้ถึงขนาดใหญหรือถึงขนาดเล็กหลายถัง? ถังขนาดใหญ่แค่ไหน? ถังทำจากวัสดุอะไร? ถังต้องให้ความร้อนด้วยไหม? ถ้าใช่ต้องใช้ต้นทุนเท่าไรและให้ความร้อนอย่างไร? ให้ความร้อนด้วยเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าภายในหรือภายนอกเครื่องปฏิกรณ์? หรือให้ความร้อนโดยการส่งของเหลวร้อนผ่านเข้าไปในท่อให้ความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์? หรือให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์? ปฏิริยาเป็นปฏิริยาคายความร้อนที่ให้ความร้อนในตัวเองได้ ทำให้การให้ความร้อนจำเป็นเฉพาะช่วงเริ่มต้นเท่านั้น? ถ้าใช่อาจจะเปิดได้หรือไม่? จะต้องออกแบบการวัดและควบคุมอะไรบ้างเพื่อป้องกันการระเบิด?
2. สารตั้งต้นควรหาจากที่ไหน? โดยการซื้อหรือผลิตเอง? สัดส่วนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จะเป็นเท่าใด?
3. กระแสออกจากเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยผลผลิตและสารตั้งต้นที่ใช้ไม่หมด ควรขายตามที่ได้ออกมาหรือควรแยกผลผลิตออกจากสารตั้งต้นแล้วส่งกลับไปยังเครื่องปฏิกรณ์ใหม่? หากต้องการแยกผลผลิตและสารตั้งต้นออกจากกัน จะทำการแยกได้อย่างไร? แยกด้วยการกลั่น? แยกด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย? หากสารทั้งสองเป็นแก๊ส อาจแยกด้วยการควบแน่นตัวใดตัวหนึ่งออกมา? หรือถ้าเป็นของเหลว อาจแยกด้วยการตกผลึก? หากเลือกทางเลือกใดทางเลือกหนึ่งในการแยกผลผลิตและสารตั้งต้นได้แล้ว จะออกแบบอุปกรณ์อย่างไร? ขนาดไหน? วัสดุที่ใช้สร้างคืออะไร? ต้องการความร้อนหรือความเย็น? ต้องมีระบบควบคุม? การควบคุมแบบไหน? ควรเป็นแบบควบคุมด้วยคนหรือแบบอัตโนมัติ?
4. การเคลื่อนย้ายสารตั้งต้นและผลผลิต เข้าหรือออกจากเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์แยกในกระบวนการผลิตอย่างไร? ด้วยแรงโน้มถ่วงจากเครื่องปฏิกรณ์หรืออุปกรณ์ที่ยกสูงขึ้น? ด้วยปั๊มโบลเวอร์ คอมเพรสเซอร์ หรือสายพาน? ชนิดไหน? ขนาด? ท่อทำจากอะไร?
5. มีความรู้เพียงพอเกี่ยวกับระบบปฏิริยาที่จะสามารถตอบคำถามเหล่านี้ทั้งหมดได้หรือไม่? หรือควรทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพิ่มเติม? ศึกษาอะไร? ข้อมูลห้องปฏิบัติการ (laboratory data) สามารถนำมาใช้โดยตรงในการออกแบบโรงงานอุตสาหกรรม (industrial plant)? หรือควรสร้างโรงงานต้นแบบ (pilot plant) ขนาดเล็กขึ้นก่อนเพื่อทดสอบการออกแบบ? โรงงานต้นแบบขนาดแค่ไหน?
6. อะไรอาจผิดพลาดในกระบวนการนี้? และจะอย่างไรหากเกิดข้อผิดพลาดขึ้น?
7. มีของเสียเกิดจากกระบวนการหรือไม่? ในปริมาณเท่าใด? อาจเป็นอันตรายหากปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่ได้รับการบำบัด? ถ้าใช่ของเสียปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอย่างไร? การลดอันตรายจากมลพิษควรทำอย่างไร? ใช้วิธีการทางเคมี? กำจัดของเสียที่เป็นของเหลวและของแข็งอย่างไร? มีการกระจายของแก๊สสู่บรรยากาศด้วยปล่องไฟสูง? แยกของแข็งออกจากไอเสียด้วยไฟฟ้าสถิต?

8. กระบวนการการทำงานอัตโนมัติมากน้อยเพียงใด? การออกแบบระบบอัตโนมัติจะอย่างไร?
9. ทั้งหมดนี้ราคาเท่าไร? ขายสินค้าได้เท่าไร? ขายให้ใคร? กระบวนการจะได้กำไรเท่าไรในแต่ละปี? คำนวณการลงทุน? ควรสร้างโรงงานที่ไหน?
10. เมื่อสร้างโรงงานแล้ว ควรปฏิบัติตามขั้นตอนใดในการเริ่มต้น (startup)?
11. หกเดือนต่อมาเมื่อเริ่มต้นได้สำเร็จ ทำไมผลผลิตจึงไม่ออกมาเหมือนที่ทำในห้องปฏิบัติการ? อุปกรณ์ทำงานผิดพลาดหรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในภาวะระหว่างห้องปฏิบัติการและกระบวนการทางอุตสาหกรรมหรือไม่? เราจะได้รู้ได้อย่างไร? จะทำอย่างไรเพื่อแก้ไขปัญหา? จำเป็นต้องหยุดดำเนินการเพื่อแก้ไขหรือไม่?
12. หากในช่วงหกเดือน เกิดการระเบิดสามครั้งและไฟไหม้สี่ครั้งในหน่วยเครื่องปฏิกรณ์ เหตุการณ์นี้เป็นเรื่องสำคัญที่ต้องแก้ไข หรือเป็นเพียงเรื่องบังเอิญ? ไม่ว่าในกรณีใด เราจะยับยั้งไม่ให้เกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นอีกได้อย่างไร?
13. เหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดความผิดพลาด ทำไมจึงไม่อยู่ในรายการที่คาดการณ์สิ่งที่อาจผิดพลาดได้? จะทำอย่างไรเพิ่มเติมอีก?
14. ในที่สุดกระบวนการสามารถเริ่มทำงานอย่างสมบูรณ์ แต่ในวันต่อมาลูกค้าแจ้งขอเปลี่ยนแปลงข้อมูลจำเพาะของผลผลิต จะปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างไรโดยไม่ออกแบบกระบวนการทั้งหมดใหม่? ทำไมไม่คิดเรื่องนี้ก่อนการสร้างโรงงาน?

จะเห็นได้ว่าปัญหาที่วิศวกรเคมีจะต้องคิดและแก้ไข มีทั้งส่วนของการออกแบบกระบวนการใหม่ โดยเริ่มจากการนำข้อมูลจากห้องปฏิบัติการที่นักเคมีเป็นผู้คิดค้น มาคำนวณและออกแบบกระบวนการให้สามารถผลิตได้จริงในระดับอุตสาหกรรม หรือการนำข้อมูลจากกระบวนการที่มีอยู่แล้วมาวิเคราะห์ พัฒนา และปรับปรุงให้กระบวนการมีประสิทธิภาพดีขึ้น ช่วยลดต้นทุนการผลิต หรือเพื่อให้ได้ผลผลิตตามความต้องการของผู้บริโภค

1.3 หน่วยและมิติ (Units and Dimensions)

การระบุปริมาณใด ๆ ที่วัดได้ จะระบุเป็นตัวเลขและหน่วย เช่น เวลา 5 วินาที ระยะทาง 2 เมตร และมวล 4.29 กิโลกรัม การระบุหน่วยต่อท้ายตัวเลขมีความจำเป็นและมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการคำนวณทางวิศวกรรม ในกรณีที่ “ตัวเลขหรือปริมาณที่วัดได้” ซึ่งเรียกว่า “มิติ” มีตัวเลขที่เท่ากัน อาจมีขนาดที่ต่างกัน เช่น ความยาวของไม้บรรทัดเท่ากับ 1 ฟุต และความยาวของไม้เมตรเท่ากับ 1 เมตร เป็นที่ทราบอยู่แล้วว่าความยาวของไม้บรรทัดและไม้เมตรมีขนาดที่ไม่เท่ากัน ดังนั้น การระบุปริมาณใด ๆ จำเป็นจะต้องระบุทั้งปริมาณที่เป็นตัวเลขและหน่วยของแต่ละตัวเลขควบคู่กันไปเสมอ ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่า “หน่วย” เป็นวิธีการในการแสดงขนาดของมิติตารางที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมิติและหน่วย ทั้งนี้ได้มีการระบุตัวอักษรย่อภาษาอังกฤษของหน่วยมาด้วย เช่น แรงม้าซึ่งเป็นหน่วยของกำลังงาน สามารถเขียนแทนด้วย hp

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมิติและหน่วย

มิติ (dimensions)	หน่วย (units)
เวลา (time)	วินาที (s) นาที (min) ชั่วโมง (h) วัน (day)
มวล (mass)	กิโลกรัม (kg) กรัม (g) ปอนด์มวล (lb _m)
ความยาว (length)	เมตร (m) เซนติเมตร (cm) ฟุต (ft) นิ้ว (in) ไมล์ (mile) หลา (yd)
ปริมาตร (volume)	ลูกบาศก์เมตร (m ³) ลูกบาศก์เดซิเมตร (dm ³) ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm ³) ลูกบาศก์ฟุต (ft ³) ลูกบาศก์นิ้ว (in ³) ลิตร (L) มิลลิลิตร (mL) แกลลอน (gal)
แรง (force)	นิวตัน (N) ปอนด์แรง (lb _f) ดายน์ (dyne)
พลังงาน (energy)	จูล (J) แคลอรี (cal) บีทียู (Btu) กิโลวัตต์ชั่วโมง (kW·h)
กำลังงาน (power)	วัตต์ (W) แรงม้า (hp) แคลอรีต่อวินาที (cal/s)
ความดัน (pressure)	ปาสกาล (Pa) ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) บรรยากาศ (atm) บาร์ (bar) มิลลิเมตรปรอท (mm Hg) นิ้วปรอท (in Hg) เมตรน้ำ (m H ₂ O) ฟุตน้ำ (ft H ₂ O)
อุณหภูมิ (temperature)	เคลวิน (K) องศาเซลเซียส (°C) องศาแรงคิน (°R) องศาฟาเรนไฮต์ (°F)

การบวก ลบ คูณ หาร ปริมาณใด ๆ สามารถทำได้เช่นเดียวกับการบวก ลบ คูณ หาร ตัวแปรพีชคณิต โดยค่าตัวเลขสองปริมาณสามารถบวกหรือลบกันได้ เฉพาะปริมาณที่มีหน่วยเหมือนกันเท่านั้น เช่น

$$3 \text{ เมตร} - 1 \text{ เมตร} = 2 \text{ เมตร} \quad (3x - x = 2x)$$

$$\text{แต่ } 1 \text{ นาที} + 3 \text{ เซนติเมตร} = ? \quad (x + 3y = ?)$$

หากปริมาณมีหน่วยต่างกัน จะต้องทำการเปลี่ยนหน่วยให้เหมือนกันก่อน จึงจะบวกหรือลบกันได้ เช่น ตัวอย่างการบวกปริมาณของกำลังงานที่มีหน่วยต่างกัน ดังนี้

$$2 \text{ แรงม้า} + 150 \text{ วัตต์}$$

$$\text{จาก } 1 \text{ แรงม้า} = 746 \text{ วัตต์}$$

$$\text{ดังนั้น } 2 \text{ แรงม้า} = 2 \times 746 \text{ วัตต์} = 1492 \text{ วัตต์}$$

$$2 \text{ แรงม้า} + 150 \text{ วัตต์} = 1492 \text{ วัตต์} + 150 \text{ วัตต์} = 1642 \text{ วัตต์}$$

แต่สำหรับการคูณหรือการหารตัวเลขที่มีหน่วยต่างกัน สามารถคูณหรือหารได้โดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนหน่วยให้เหมือนกันก่อน โดยการคูณหรือการหารจะทำให้มิติเปลี่ยนไป เช่น

$$\text{ระยะทาง} \div \text{เวลา} = \text{ความเร็ว} \quad \text{เช่น} \quad 5 \text{ km} \div 2 \text{ h} = 2.5 \text{ km/h}$$

$$\text{แรง} \times \text{ระยะทาง} = \text{พลังงาน} \quad \text{เช่น} \quad 3 \text{ N} \times 4 \text{ m} = 12 \text{ N} \cdot \text{m (Joule)}$$

$$\text{มวล} \div \text{มวล} = \text{ปริมาณไร้หน่วย} \quad \text{เช่น} \quad 6 \text{ g} \div 2 \text{ g} = 3$$

ปริมาณไร้มิติ (dimensionless quantity) คือ ปริมาณหรือมิติที่ไม่มีหน่วย อาจเกิดจากการรวมกันของตัวแปรหลาย ๆ ตัว เช่น ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) เลขเพรานด์เทิล (Prandtl number) และเลขชมิตต์ (Schmidt number) เป็นต้น

ความถ่วงจำเพาะ (SG) เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของสารหนึ่ง ๆ ต่อความหนาแน่นของสารอ้างอิง ซึ่งสารอ้างอิงที่นิยมใช้คือน้ำ แต่เนื่องจากความหนาแน่นของน้ำนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความดัน จึงกำหนดให้ความถ่วงจำเพาะใช้ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4°C และความดันบรรยากาศปกติ เป็นความหนาแน่นของสารอ้างอิง ซึ่งในกรณีนี้ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1000 kg/m³

$$SG = \frac{\rho_{\text{substance}}}{\rho_{\text{reference}}} = \frac{\rho_{\text{substance}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad 1-1$$

เลขเรย์โนลด์ส (N_{Re}) เป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการไหล ที่การไหลเปลี่ยนจากการไหลแบบเป็นชั้น (laminar flow) ไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) สูตรที่ใช้ในทางวิศวกรรมของเลขเรย์โนลด์ส สำหรับของไหลในท่อสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Ne = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad 1-2$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ มีหน่วยเป็น m

v คือ ความเร็วของของไหลในท่อ มีหน่วยเป็น m/s

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล มีหน่วยเป็น kg/m³

μ คือ ความหนืดของของไหล มีหน่วยเป็น kg/m · s

เลขเพรานด์เทิล (N_{Pr}) เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของของไหลในการส่งผ่านโมเมนตัมในของไหลเมื่อเทียบกับการส่งผ่านความร้อนในของไหล สูตรการคำนวณของเลขเพรานด์เทิล สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\text{viscous diffusion rate}}{\text{thermal diffusion rate}} = \frac{C_p \mu}{k} \quad 1-3$$

เมื่อ v คือ ความหนืดเชิงจลนศาสตร์, $v = \mu/\rho$ มีหน่วยเป็น m²/s

α คือ การแพร่ของความร้อน, $\alpha = k/\rho C_p$ มีหน่วยเป็น m²/s

μ คือ ความหนืดเชิงพลศาสตร์ มีหน่วยเป็น Pa · s

k คือ การนำความร้อน มีหน่วยเป็น W/(m · K)

C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ มีหน่วยเป็น J/(kg · K)

ρ คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น kg/m³

เลขชมิทธ์ (N_{Sc}) เป็นอัตราส่วนของการกระจายโมเมนตัม (ความหนืดจลนศาสตร์) และการกระจายมวล ใช้เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของของไหลซึ่งมีโมเมนตัมพร้อมกันและกระบวนการพามวลกระจาย สูตรการคำนวณของเลขชมิทธ์ สามารถเขียนได้ว่า

$$Sc = \frac{v}{D} = \frac{\text{viscous diffusion rate}}{\text{molecular (mass) diffusion rate}} = \frac{\mu}{\rho D} \quad 1-4$$

เมื่อ v คือ ความหนืดเชิงจลนศาสตร์, $v = \mu/\rho$ มีหน่วยเป็น m^2/s

D คือ การกระจายมวล มีหน่วยเป็น m^2/s

μ คือ ความหนืดเชิงพลศาสตร์ มีหน่วยเป็น $Pa \cdot s$ หรือ $kg/m \cdot s$

ρ คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น kg/m^3

การระบุขนาดของมิติใด ๆ จำเป็นจะต้องระบุหน่วยด้วยเสมอ เพื่อให้การสื่อสารข้อมูลและการคำนวณเป็นไปอย่างถูกต้อง ตารางที่ 1.2 แสดงหน่วยของมิติใด ๆ ในระบบที่เป็นมาตรฐานและนิยมใช้ได้แก่ ระบบเอสไอ (International System; SI system) และระบบอังกฤษ (Imperial system; FPS system) ซึ่งการแปลงหน่วยที่ต่างระบบให้เป็นระบบเดียวกัน สามารถทำได้โดยใช้แฟกเตอร์การแปลงหน่วย (conversion factors) แสดงข้อมูลในภาคผนวก ตารางที่ A.1

ตารางที่ 1.2 หน่วยในระบบเอสไอและระบบอังกฤษ

มิติ	หน่วยในระบบเอสไอ	หน่วยในระบบอังกฤษ
เวลา	s, min, h, day, y	s, min, h, day, y
มวล	kg, g, ton	lb _m
โมล	g-mole หรือ mol kg-mole หรือ kmol	lb-mole
ความยาว	m	ft
แรง	N หรือ $kg \cdot m \cdot s^{-2}$	lb _f
พลังงาน	J หรือ $N \cdot m$ หรือ $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$	Btu ft · lb _f
กำลังงาน	W หรือ $J \cdot s^{-1}$ หรือ $kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$	hp
ความดัน	Pa หรือ $N \cdot m^{-2}$	psi หรือ $lb_f \cdot in^{-2}$
อุณหภูมิ	K °C	°R °F
ความจุความร้อน	J / (kg)(K)	Btu / (lb _m)(°F)

(ที่มา: ปรับปรุงจาก Himmelblau และ Riggs, 2012)

เมื่อหน่วยใด ๆ มีคำเติมหน้า (prefix) ปริมาณในหน่วยนั้น ๆ จะมีค่าเท่ากับปริมาณในหน่วยนั้น ๆ คุณ 10 ยกกำลังด้วยคำเติมหน้า คำเติมหน้าที่นิยมใช้ได้แก่

giga (G)	= 10^9	centi (c)	= 10^{-2}
mega (M)	= 10^6	milli (m)	= 10^{-3}
kilo (k)	= 10^3	micro (μ)	= 10^{-6}
Deci (d)	= 10^{-1}	nano (n)	= 10^{-9}

เช่น 1 เมกะวัตต์ = 1 MW = 10^6 W

ตัวอย่างที่ 1.1 หน่วยและมิติ

จงระบุมิติที่สอดคล้องกับหน่วย ต่อไปนี้

- | | |
|------------------------------------|------------|
| (1) $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ | [แรง] |
| (2) N/m^2 | [ความดัน] |
| (3) lb_f/in^2 | [ความดัน] |
| (4) $\text{N} \cdot \text{m/s}$ | [กำลังงาน] |
| (5) $\text{kW} \cdot \text{h}$ | [พลังงาน] |

1.4 การแปลงหน่วย (Conversion of Units)

มิติหรือสมบัติที่วัดได้ สามารถแสดงได้โดยการระบุหน่วยที่มีความสัมพันธ์กับมิตินั้น ๆ เช่น ความเร็วสามารถแสดงในเทอมของ ฟุต/วินาที ไมล์/ชั่วโมง เซนติเมตร/ปี หรืออัตราส่วนใด ๆ ของหน่วยระยะทางต่อหน่วยเวลา ค่าตัวเลขของความเร็วจะขึ้นกับหน่วยที่เลือกใช้ เมื่อปริมาณที่วัดได้มีหน่วยที่แตกต่างกัน ค่าตัวเลขในแต่ละหน่วยย่อมไม่เท่ากัน ในการเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ที่มีหน่วยต่างกัน จะต้องทำให้ค่าเหล่านั้นมีหน่วยเหมือนกันก่อน โดยการคูณปริมาณเดิมด้วยแฟกเตอร์การแปลงหน่วย (conversion factors) ซึ่งเป็นสัดส่วนของตัวเลขที่มีหน่วยต่างกันแต่มีค่าเท่ากัน

เช่น $\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}, \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}, \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right)^2 = \frac{1 \text{ m}^2}{10^4 \text{ cm}^2}$ หรือ $\left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}\right)^3 = \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3}$

การแปลงปริมาณหนึ่งซึ่งแสดงไว้ในเทอมของหน่วยหนึ่ง ไปเป็นปริมาณที่เท่ากันแต่แสดงได้ในอีกหน่วยหนึ่ง ทำได้โดยการคูณปริมาณเดิมด้วยแฟกเตอร์การแปลงหน่วย (หน่วยใหม่/หน่วยเก่า) เช่น การแปลง 36 mg เป็นค่าที่เท่ากันในหน่วย สามารถทำได้ดังนี้

$$36 \text{ mg} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.036 \text{ g}$$

อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กัน คือ การใช้เส้นตรงแนวตั้ง แทนเครื่องหมายคูณ

$$\frac{36 \text{ mg}}{1} \left| \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right| = 0.036 \text{ g}$$

การใส่หน่วยลงไปในค่าเช่นนี้เป็นวิธีที่ดีมาก ทำให้หลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้จากการสับสนในการนำแฟกเตอร์การแปลงหน่วยมาคูณหรือหาร ดังตัวอย่าง การเปลี่ยนหน่วย มิลลิกรัมเป็นกรัม ถูกต้องเพราะหน่วยมิลลิกรัมหายไป เหลือแต่หน่วยกรัมอยู่ทางขวามือเท่านั้น ซึ่งหากทำผิดจะเป็นดังนี้

$$\frac{36 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \left| \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right| = 3.6 \times 10^4 \text{ mg}^2/\text{g}$$

ดังนั้น หากเรามีหน่วยที่ประกอบด้วยหลายหน่วยพื้นฐาน เช่น (กรัม)(เซนติเมตร)/(วินาที)² และเราต้องการจะแปลงค่านี้เป็นค่าในหน่วยอื่น สามารถทำได้โดยการเขียนปริมาณเดิมและหน่วยเดิมไว้ทางซ้าย คูณหรือหารด้วยแฟกเตอร์การแปลงหน่วยที่จะตัดหน่วยเก่าให้หายไป และแทนที่ด้วยหน่วยใหม่ตามลำดับ จนกว่าจะได้หน่วยที่ต้องการ เช่น

$$2.4 \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2} \left| \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right| = 2.4 \times 10^{-5} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = 2.4 \times 10^{-5} \text{ N}$$

$$2 \text{ hp} + 150 \text{ W} = \frac{2 \text{ hp}}{1.341 \times 10^{-3} \text{ hp}} \left| \frac{1 \text{ W}}{1.341 \times 10^{-3} \text{ hp}} \right| + 150 \text{ W}$$

$$= 1641.4 \text{ W}$$

ข้อควรระวังในการแปลงหน่วย

- การใช้แฟกเตอร์ไม่ถูกที่
- การใส่หน่วยไม่ครบ
- การเข้าใจผิดจากการระบุหน่วยที่ไม่ชัดเจน

การคูณของหน่วย ปกตินิยมใช้จุดคั่นกลางบริเวณกลางตัวอักษร หรืออาจใส่วงเล็บแทนการใส่จุด หรืออาจไม่ใช้ก็ได้ เช่น นิวตัน×เมตร เขียนแทนด้วย

N·m หรือ (N)(m) หรือ Nm

แต่ m·N ถ้าเขียนเป็น mN อาจหมายถึง มิลลินิวตัน

การหารของหน่วย อาจเขียนได้เป็น

m/s หรือ m·s⁻¹

N/m² หรือ N·m⁻² (Pa; ปาสกาล)

lb_f/in² หรือ lb_f·in⁻² (psi; ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

ตัวอย่างที่ 1.2 การแปลงหน่วย

(1) ระยะทางจาก 2 km เท่ากับเท่าใดในหน่วย mile

วิธีทำ

จากตารางแฟกเตอร์การแปลงหน่วย

$$1 \text{ mile} = 1.60935 \text{ km} \quad \text{หรือ} \quad 1 \text{ m} = 0.0006214 \text{ miles}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad 2 \text{ km} = \frac{2 \text{ km}}{1.60935 \text{ km}} \left| \frac{1 \text{ mile}}{1.60935 \text{ km}} \right|$$

$$= 1.243 \text{ miles}$$

#

$$\text{หรือ} \quad 2 \text{ km} = \frac{2 \text{ km}}{1 \text{ km}} \left| \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right| \left| \frac{0.0006214 \text{ mile}}{1 \text{ m}} \right|$$

$$= 1.243 \text{ miles}$$

#

(2) ความเร็ว 1 cm/s² เท่ากับเท่าใดในหน่วย km/y²

วิธีทำ

$$1 \text{ cm/s}^2 = \frac{1 \text{ cm}}{\text{s}^2} \left| \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right| \left| \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \right| \left| \frac{3600^2 \text{ s}^2}{1^2 \text{ h}^2} \right| \left| \frac{24^2 \text{ h}^2}{1^2 \text{ day}^2} \right| \left| \frac{365^2 \text{ day}^2}{1^2 \text{ y}^2} \right|$$

$$= \frac{3600^2 \times 24^2 \times 365^2}{100 \times 1000} \text{ km/y}^2$$

$$= 9.95 \times 10^9 \text{ km/y}^2$$

#

(3) 23 lb_m · ft/min² เท่ากับเท่าใดในหน่วย kg · cm/s²

วิธีทำ

$$23 \text{ lb}_m \cdot \text{ft/min}^2 = \frac{23 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{min}^2} \left| \frac{0.454 \text{ kg}}{1 \text{ lb}_m} \right| \left| \frac{100 \text{ cm}}{3.2808 \text{ ft}} \right| \left| \frac{1^2 \text{ min}^2}{60^2 \text{ s}^2} \right|$$

$$= \frac{23 \times 0.454 \times 100}{3.2808 \times 60^2} \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}$$

$$= 0.088 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}$$

#

โจทย์ปัญหาที่ 1.1 จงแปลงหน่วยต่อไปนี้

- | | | |
|--|--|---|
| (1) 400 in ³ /day | ให้เป็น cm ³ /min | [4.552 cm ³ /min] |
| (2) 5 cm ² | ให้เป็น mm ² | [500 mm ²] |
| (3) 0.3 Mg | ให้เป็น mg | [3 × 10 ⁸ mg] |
| (4) 1 cm/min ² | ให้เป็น km/day ² | [20.736 km/day ²] |
| (5) 2 L/s | ให้เป็น ft ³ /y | [2.227 × 10 ⁶ ft ³ /y] |
| (6) 6.2 cm/h ² | ให้เป็น nm/s ² | [4.78 nm/s ²] |
| (7) 5 MPa | ให้เป็น lb _f /ft ² | [1.044 × 10 ⁵ lb _f /ft ²] |
| (8) 3.8 lb _m /ft ³ | ให้เป็น kg/m ³ | [60.87 kg/m ³] |
| (9) 921 kg/m ³ | ให้เป็น lb _m /ft ³ | [57.49 lb _m /ft ³] |
| (10) 10 W | ให้เป็น g·cm ² ·s ⁻³ | [10 ⁸ g·cm ² ·s ⁻³] |
| (11) 5.37 × 10 ⁶ kJ/min | ให้เป็น hp | [1.2 × 10 ⁵ hp] |

โจทย์ปัญหาที่ 1.2 จงหาปริมาตรของแก๊สที่บรรจุอยู่ในถังทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 cm และสูง 50 cm ในหน่วยต่อไปนี้

- | | |
|-----------------|-------------------------|
| (1) ลิตร | [7.7 L] |
| (2) ลูกบาศก์ฟุต | [0.27 ft ³] |

ตัวอย่างที่ 1.3 มวลและน้ำหนัก

น้ำหนัก (weight) หมายถึง แรงที่เกิดจากอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational acceleration; g) มักใช้สัญลักษณ์ W หน่วยของน้ำหนักเหมือนกับหน่วยของแรง ดังนั้นการแปลงหน่วยระหว่างมวลและน้ำหนัก สามารถใช้แฟกเตอร์การแปลงหน่วยระหว่างมวลและแรง ดังนี้

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad \text{หรือ} \quad 1 \text{ lb}_f = 32.174 \text{ lb}_m \cdot \text{ft/s}^2$$

ซึ่งค่า g ที่ระดับน้ำทะเล ละติจูด 45 องศา เท่ากับ 9.8066 m/s² และ 32.174 ft/s²

- (1) จงคำนวณความแตกต่างของน้ำหนักของจรวดมวล 100 kg ที่อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 10 km ซึ่งมีค่า g = 9.76 m/s² เทียบกับน้ำหนักจรวดที่ระดับน้ำทะเล ซึ่งมีค่า g = 9.80 m/s²

(ที่มา: ปรับปรุงจาก Himmelblau และ Riggs, 2012, Ex.1.6)

วิธีทำ

$$\text{จาก } W (\text{น้ำหนัก}) = mg$$

$$W_{\text{ที่ระดับน้ำทะเล}} = 100 \text{ kg} \times 9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \frac{\text{N}}{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2} = 980 \text{ N}$$

$$W_{\text{ที่ความสูง 10 km}} = 100 \text{ kg} \times 9.76 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \frac{\text{N}}{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2} = 976 \text{ N}$$

$$\Delta W = 980 - 976 = 4 \text{ N} \quad \#$$

(2) น้ำปริมาตร 2.0 ft^3 จะมีน้ำหนักเท่าใด ที่ระดับน้ำทะเลและที่ระดับความสูง 6000 ft กำหนดให้น้ำมีความหนาแน่น $62.4 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$ และความเร่งจากแรงโน้มถ่วงที่ระดับความสูง 6000 ft เท่ากับ 32.139 ft/s^2

(ที่มา: ปรับปรุงจาก Felder และ Rousseau, 2005, Ex.2.4-1)

วิธีทำ

$$\text{มวลของน้ำปริมาตร } 2.0 \text{ ft}^3 = \frac{2.0 \text{ ft}^3}{1} \left| \frac{62.4 \text{ lb}_m}{\text{ft}^3} \right| = 124.8 \text{ lb}_m$$

$$W_{\text{ที่ระดับน้ำทะเล}} = 124.8 \text{ lb}_m \left| \frac{32.174 \text{ ft}}{\text{s}^2} \right| \left| \frac{\text{lb}_f}{32.174 \text{ lb}_m \cdot \text{ft/s}^2} \right| = 124.8 \text{ lb}_f \quad \#$$

$$W_{\text{ที่ความสูง 6000 ft}} = 124.8 \text{ lb}_m \left| \frac{32.139 \text{ ft}}{\text{s}^2} \right| \left| \frac{\text{lb}_f}{32.174 \text{ lb}_m \cdot \text{ft/s}^2} \right| = 124.664 \text{ lb}_f \quad \#$$

โจทย์ปัญหาที่ 1.3 จงแสดงวิธีการหาค่าแฟกเตอร์การแปลงหน่วยระหว่างน้ำหนักในหน่วย N และ lb_f ที่ระดับน้ำทะเล ละติจูด 45 องศา [1 N = 0.22481 lb_f]

ตัวอย่างที่ 1.4 การแปลงหน่วยในงานวิศวกรรมเคมี

หาค่าการนำความร้อนของวัสดุของแข็งในหน่วย $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ คำนวณได้จาก $k = \frac{xQ}{A\Delta T}$

เมื่อ Q คืออัตราการถ่ายเทความร้อน, x คือ ความหนาของวัสดุของแข็ง, A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน และ ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่วัสดุของแข็ง

จากการทดลอง พบว่า $Q = 10,000 \text{ kJ/h}$, $x = 100 \text{ mm}$, $A = 1 \text{ m}^2$ และ $\Delta T = 800 \text{ K}$

(1) จงหาค่าการนำความร้อนของวัสดุของแข็งในหน่วย $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

(2) จงหาค่าการนำความร้อนของวัสดุของแข็งในหน่วย $\text{cal}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

(ที่มา: ปรับปรุงจาก Narayanan และ Lakshmikutty, 2017, Ex.2.4)

วิธีทำ

$$\begin{aligned}k &= \frac{xQ}{A\Delta T} = \frac{(100 \text{ mm})(10,000 \text{ kJ/h})}{(1 \text{ m}^2)(800 \text{ K})} \left| \frac{\text{W}}{\text{J/s}} \right| \left| \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \right| \left| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right| \\&= 0.347 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \# \\&= \frac{0.347 \text{ W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \left| \frac{\text{J/s}}{\text{W}} \right| \left| \frac{0.2391 \text{ cal}}{1 \text{ J}} \right| \left| \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right| \left| \frac{\text{K}}{^\circ\text{C}} \right| = 298.7 \text{ cal}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad \#\end{aligned}$$

1.5 การคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม (Numerical Calculation for Solving Engineering Problems)

1.5.1 เลขนัยสำคัญ (Significant Figures)

โดยทั่วไปแล้ว ในการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจะพบปริมาณทางกายภาพที่แสดงด้วยตัวเลขเสมอ วิธีการที่ง่ายและสะดวกในการแสดงค่าของปริมาณทางกายภาพเหล่านั้น คือ การแสดงในรูปของสัญกรณ์วิทยาศาสตร์ (scientific notation) ซึ่งคือ การแสดงตัวเลขในรูปของผลคูณของเลขใด ๆ (มักจะอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10) และเลขยกกำลังของ 10 เช่น

$$124,000,000 = 1.24 \times 10^8 \text{ (หรือ } 0.124 \times 10^9)$$

$$0.00065 = 6.5 \times 10^{-4} \text{ (หรือ } 0.65 \times 10^{-5})$$

เลขนัยสำคัญ คือ จำนวนหลักของตัวเลขที่แสดงความเที่ยงตรงของปริมาณที่วัดหรือคำนวณได้ เช่น สำหรับการอ่านความยาวสามารถอ่านได้ค่าละเอียดที่สุดที่เครื่องวัดอ่านค่าได้ แล้วประมาณค่าอีก 1 ตำแหน่งถัดไป ดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ความละเอียดของเครื่องวัด

การรายงานตัวเลขของค่าที่วัดได้หรือคำนวณได้ จะแสดงถึงความแม่นยำ (precision) ของจำนวนนั้น ๆ ยิ่งมีเลขนัยสำคัญมากเท่าใด ค่าก็ยิ่งแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น สาร A ปริมาณ 2.1169 กรัม ย่อมหมายถึง มีมวลของสาร A 2 กรัม และวัดค่าได้แน่นอนถึงเศษหนึ่งส่วนหมื่นกรัม ตัวเลข 5 ตัวที่ประกอบเป็นจำนวนนี้ เรียกว่า เลขนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกัน ถ้าเขียนว่า สาร A ปริมาณ 2.12 กรัม จะหมายถึง มีมวลของสาร A 2 กรัม เช่นเดียวกัน แต่วัดค่าได้แน่นอนเพียงเศษหนึ่งส่วนร้อยกรัม ในที่นี้เลขนัยสำคัญมีเพียง 3 ตัว ดังนั้นการแสดงจำนวนและตัวเลขในการคำนวณจึงต้องคำนึงถึงเลขนัยสำคัญให้มาก

สำหรับจำนวนที่มีตัวเลขศูนย์อยู่ด้วย การตัดสินใจว่ามีเลขนัยสำคัญกี่ตัว อาจตัดสินใจได้ลำบาก เช่น 3000 มิลลิลิตร อาจเป็นไปได้ว่าตวงได้ละเอียดถึง 1 มิลลิลิตร คือ อาจเป็น 3001 หรือ 2999 มิลลิลิตร หรืออาจตวงได้ละเอียดเพียง 100 มิลลิลิตร คือ อาจเป็น 3100 หรือ 2900 มิลลิลิตร ก็ได้

เพื่อป้องกันความสับสนของการตัดสินใจเรื่องเลขนัยสำคัญ จึงกำหนดเกณฑ์ทั่วไปในการระบุปริมาณจำนวนหนึ่ง ๆ ว่าให้เขียนในรูปของสัญกรณ์วิทยาศาสตร์ ดังนั้น 3000 มิลลิลิตร ให้เขียน 3.000×10^3 สำหรับกรณีแรก และ 3.0×10^3 สำหรับกรณีหลัง

การระบุเลขนัยสำคัญของจำนวนใด ๆ สามารถระบุได้ดังนี้ (1) กรณีมีทศนิยมให้นับจำนวนจากตัวเลขจากตัวเลขที่ไม่ใช่ศูนย์ทางซ้ายมือไปยังตัวเลขสุดท้ายทางขวามือ (ศูนย์หรือไม่ใช่ศูนย์) (2) กรณีไม่มีทศนิยม ให้นับไปถึงตัวเลขสุดท้ายทางขวามือ การแสดงตัวเลขในรูปของสัญกรณ์วิทยาศาสตร์จะทำให้สามารถระบุเลขนัยสำคัญได้ง่าย เช่น

2300	หรือ	2.3×10^3	มีเลขนัยสำคัญเท่ากับ 2
2300	หรือ	2.30×10^3	มีเลขนัยสำคัญเท่ากับ 3
2300	หรือ	2.300×10^3	มีเลขนัยสำคัญเท่ากับ 4
0.035	หรือ	3.5×10^{-2}	มีเลขนัยสำคัญเท่ากับ 2
0.03500	หรือ	3.500×10^{-2}	มีเลขนัยสำคัญเท่ากับ 4
0.0000001	หรือ	1×10^{-7}	มีเลขนัยสำคัญเท่ากับ 1

มีกฎกล่าวว่า ในการคำนวณเมื่อมีปริมาณตั้งแต่สองจำนวนขึ้นไปรวมกันด้วยการคูณและ/หรือการหาร จำนวนเลขนัยสำคัญของผลลัพธ์จะต้องเท่ากับ เลขนัยสำคัญของข้อมูลที่มีเลขนัยสำคัญน้อยที่สุด หากผลลัพธ์เริ่มต้นจากการคำนวณละเมียดกฎนี้ จะต้องปัดเศษผลลัพธ์เพื่อลดจำนวนของเลขนัยสำคัญให้เหลือค่าสูงสุดที่กฎอนุญาต และหากมีการคำนวณหลาย ๆ ครั้งต่อเนื่องกัน ให้ทำการคำนวณจนได้ผลลัพธ์ และปัดเศษเฉพาะผลลัพธ์สุดท้าย ตัวอย่างเช่น

$$\begin{array}{ccccccc} (3) & (4) & (7) & & (3) & & \\ (3.57) & (4.286) & = 15.30102 & \Rightarrow & 15.3 & & \\ (2) & (4) & (3) & (9) & (2) & (2) & \\ (5.2 \times 10^{-4}) & (0.1635 \times 10^7) & / & (2.67) & = 318.426966 & \Rightarrow & 3.2 \times 10^2 = 320 \end{array}$$

(ตัวเลขด้านบนในวงเล็บแสดงเลขนัยสำคัญของแต่ละจำนวน)

ในการคำนวณเมื่อมีปริมาณตั้งแต่สองจำนวนขึ้นไปรวมกันด้วยการบวกและ/หรือการลบ ให้ตั้งตัวเลขในรูปแบบของเลขยกกำลังที่คูณด้วย 10 ยกกำลังด้วยตัวเลขเดียวกันทุกตัว แล้วนำจำนวนมาบวกและ/หรือลบกัน ผลลัพธ์จะต้องมีจำนวนเลขทศนิยมเท่ากับ เลขทศนิยมของข้อมูลที่มีเลขทศนิยมน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น $24,000 + 168,900 + 72.3 + 1510$

$$\begin{array}{rcl} & 2.4 & \times 10^4 \\ & 16.8900 & \times 10^4 \\ & 0.00723 & \times 10^4 \\ & 0.1510 & \times 10^4 \\ \text{ผลลัพธ์ คือ} & 19.44823 & \times 10^4 \end{array}$$

ผลลัพธ์จะมีจำนวนเลขทศนิยมเท่ากับ เลขทศนิยมของข้อมูลที่มีเลขทศนิมน้อยที่สุด ดังนั้น เมื่อปัดเศษแล้ว ผลลัพธ์ คือ 19.4×10^4 หรือ 1.94×10^5

ในการลบ พิจารณาเช่นเดียวกับการบวก เช่น $(7.68912 \times 10^6) - (214 \times 10^3)$

$$7.68912 \times 10^6$$

$$0.214 \times 10^6$$

ผลลัพธ์ คือ 7.47512×10^6

ดังนั้นเมื่อปัดเศษแล้ว ผลลัพธ์ คือ 7.475×10^6

สำหรับการปัดเศษ เมื่อตัวเลขสุดท้ายเป็นเลข 5 ที่นิยมคือ ปัดให้ตัวเลขตัวสุดท้ายเป็นเลขคู่ เช่น

5.875 ทำให้มีเลขนัยสำคัญ 3 ตำแหน่ง ปัดเลขแล้วได้ 5.88

3.825 ทำให้มีเลขนัยสำคัญ 3 ตำแหน่ง ปัดเลขแล้วได้ 3.82

การคำนวณในทางวิศวกรรมไม่ต้องการความแม่นยำสูงมากนัก โดยทั่วไปให้ถูกต้องจนถึง 1-2% ของจำนวนนั้นก็เพียงพอแล้ว ดังนั้นในการคำนวณจำนวนต่าง ๆ ที่ใช้ ควรแสดงถึงความแม่นยำที่อยู่ในระดับเดียวกัน ดังนั้นหากไม่สามารถตัดสินใจจากข้อมูลที่โจทย์กำหนดว่ามีเลขนัยสำคัญอยู่เท่าใด ให้ทำการคำนวณโดยมีตัวเลขนัยสำคัญ 3 ถึง 4 ตัว ก็เพียงพอแล้ว

1.5.2 ความสอดคล้องของมิติ (Dimension Consistency)

ในการคำนวณทุกพจน์ในสมการต้องมีความสอดคล้องของมิติ หรือกล่าวได้ว่าขนาดทั้งสองด้านของเครื่องหมาย "เท่ากับ" ในสมการต้องเท่ากัน และแต่ละพจน์ในสมการที่บวกหรือลบกันต้องมีหน่วยเหมือนกัน แสดงว่ามิติของแต่ละพจน์ต้องเหมือนกัน

ตัวอย่างที่ 1.5 ความสอดคล้องของมิติ

(1) จากสมการซึ่งมีหน่วยของแต่ละพจน์ดังระบุในวงเล็บ จงพิสูจน์ว่าสมการมีความสอดคล้องของมิติ

(ที่มา: ปรับปรุงจาก Ghasem และ Henda, 2015, Ex.1.5)

วิธีทำ

$$X(m) = X_0(m) + 0.3048 \left(\frac{m}{ft} \right) v \left(\frac{ft}{s} \right) t(s) + 0.5a \left(\frac{m}{s^2} \right) t^2(s^2)$$

m [=] m + m + m

$$P \left(\frac{kg}{m \cdot s^2} \right) = \left(\frac{101,325 Pa}{atm} \right) \left(\frac{kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}}{Pa} \right) P_0(atm) + \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) v^2 \left(\frac{m^2}{s^2} \right)$$

kg/(ms²) [=] kg/(ms²) + kg/(ms²)

(2) จงระบุหน่วยของค่าคงที่ในสมการต่อไปนี้ $D \text{ (ft)} = 3t \text{ (s)} + 4$ และจงเขียนสมการสำหรับกรณี D' มีหน่วยเป็น m และ t' มีหน่วยเป็น min

(ที่มา: ปรับปรุงจาก Felder และ Rousseau, 2005, Ex.2.6-1)

วิธีทำ

เนื่องจากทุกพจน์ต้องมีความสอดคล้องของมิติ ทุกพจน์จะมีหน่วยเป็น ft

ดังนั้น 3 มีหน่วยเป็น ft/s และ 4 มีหน่วยเป็น ft

#

นิยาม D มีหน่วยเป็น m และ t มีหน่วยเป็น min แทนด้วย $D' \text{ (m)}$ และ $t' \text{ (min)}$

$$D \text{ (ft)} = D' \text{ (m)} \left| \frac{3.2808 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right| \quad \text{และ} \quad t \text{ (s)} = t' \text{ (min)} \left| \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right|$$

แทน D และ t ด้วย D' และ t'

$$3.28 D' = (3) (60 t') + 4$$

$$D' \text{ (m)} = 55 t' \text{ (min)} + 1.22$$

#

(3) สมการความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ถูกกัดกร่อนกับเวลา เป็นดังสมการ

$$d = 16.2 - 16.2e^{-0.021t} \quad t < 200 \quad \text{เมื่อหน่วยของ } d \text{ และ } t \text{ คือ } \mu\text{m} \text{ และ } \text{s} \text{ ตามลำดับ}$$

จงแสดงสมการความสัมพันธ์สำหรับกรณีหน่วยของ d' และ t' คือ in และ min

(ที่มา: ปรับปรุงจาก Himmelblau และ Riggs, 2012, Ex.1.7)

วิธีทำ

เนื่องจากทุกพจน์ต้องมีความสอดคล้องของมิติ ทุกพจน์จะมีหน่วยเป็น μm

ดังนั้น 16.2 มีหน่วยเป็น μm เลขยกกำลัง $-0.021t$ ไม่มีหน่วย ทำให้ 0.021 มีหน่วยเป็น $1/\text{s}$

นิยาม d มีหน่วยเป็น in และ t มีหน่วยเป็น min แทนด้วย $d' \text{ (in)}$ และ $t' \text{ (min)}$

$$d \text{ (}\mu\text{m)} = \frac{d' \text{ (in)}}{39.37 \text{ in}} \left| \frac{1 \text{ m}}{10^6 \mu\text{m}} \right| \quad \text{และ} \quad t \text{ (s)} = t' \text{ (min)} \left| \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right|$$

แทน d และ t ด้วย d' และ t'

$$d' \text{ (in)} = \frac{16.2 \mu\text{m}}{10^6 \mu\text{m}} \left| \frac{1 \text{ m}}{39.37 \text{ in}} \right| \left(1 - e^{-\frac{0.021}{\text{s}} \left| \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right| t' \text{ (min)}} \right)$$

$$d' \text{ (in)} = 6.38 \times 10^{-4} (1 - e^{-1.26 t' \text{ (min)}})$$

#

1.5.3 การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)

สมการของเส้นตรงผ่าน (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) บนพล็อตของ y เทียบกับ x คือ

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1)$$

การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นสามารถใช้สมการนี้เพื่อประมาณค่า y สำหรับ x ระหว่าง x_1 และ x_2 นอกจากนี้อาจใช้สมการนี้เพื่อประมาณค่า y สำหรับค่า x ที่อยู่นอกช่วงนี้ได้ด้วย แต่มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดความไม่ถูกต้อง

ตัวอย่างที่ 1.6 การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น

จงคำนวณหาปริมาตรจำเพาะของไอน้ำที่อุณหภูมิ 35°C เมื่อมีข้อมูลดังตาราง

อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	32	34	36
ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg)	29.6	26.6	24.0

วิธีทำ

เลือกใช้ปริมาตรจำเพาะที่อุณหภูมิ 34°C และ 36°C มาคำนวณได้ดังสมการ

$$\hat{V}_{35^\circ\text{C}} = \hat{V}_{34^\circ\text{C}} + \frac{35 - 34}{36 - 34} (\hat{V}_{36^\circ\text{C}} - \hat{V}_{34^\circ\text{C}}) = 26.6 + 0.5 (24.0 - 26.6) = 25.3 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \#$$

SE-ED
inspiration starts here

SE-ED

inspiration starts here

ໝາກເປັດ : 306

ISBN : 978-616-338-204-7



YOUTUBE CHANNEL
PRINCAL CHEMENG

Subscribe

