แผนบริหารประจำบทที่ 3

1) หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. แนวคิดในการพัฒนาแบบจำลองอะตอม
2. องค์ประกอบและแบบจำลองอะตอม
3. เลขควอนตัม
4. โครงแบบอิเล็กตรอน
5. การจัดเรียงอิเล็กตรอน
6. บทปฏิบัติการที่ 3 เรื่อง การตกผลึก
7. สรุป
8. แบบฝึกหัดท้ายบท
9. เอกสารอ้างอิง

2) วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. ระบุองค์ประกอบของอะตอมได้
2. อธิบายโครงสร้างอะตอมด้วยแบบจำลองอะตอมได้
3. บอกความหมายของเลขควอนตัมต่าง ๆ อิเล็กตรอนได้
4. เข้าใจและประยุกต์ใช้ออร์บิทัลเชิงอะตอมในการเขียนโครงแบบอิเล็กตรอนได้
5. ระบุความสำคัญของการทำบริสุทธิ์ได้อย่างเหมาะสม

3) วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอนประจำบท

1. บรรยายโดยใช้สไลด์ประกอบการสอน
2. อธิบายแลกเปลี่ยนความคิดเห็น
3. ยกกรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องมาอภิปรายร่วมกัน
4. บทปฏิบัติการประจำบทที่ 3 เรื่อง การตกผลึก
5. ทำแบบฝึกหัด และเขียนรายงานการปฏิบัติการทดลองประจำบทปฏิบัติการที่ 3

4) สื่อการเรียนการสอน

1. สไลด์ประกอบการสอน
2. เอกสารประกอบการบรรยาย
3. วัสดุ อุปกรณ์วิทยาศาสตร์บทปฏิบัติการประจำบทที่ 3
4. แบบฝึกหัด

5) การวัดและการประเมินผล

1. สังเกตจากความสนใจและการตอบคำถาม
2. สังเกตจากการปฏิบัติการทดลอง
3. ตรวจสอบจากแบบฝึกหัดท้ายบท

บทที่ 3
โครงสร้างอะตอม

อะตอมและโมเลกุลเป็นส่วนประกอบที่พบในสสารที่มีขนาดเล็กมาก ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของธาตุที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 อะตอม เรียกว่า โมเลกุลของสารประกอบ เช่น น้ำตาลกลูโคส ($C_6H_{12}O_6$), เอทานอล (C_2H_5OH), และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้นโมเลกุลบางชนิดประกอบด้วยอะตอมของธาตุชนิดเดียวกัน เรียกว่าโมเลกุลของธาตุ เช่น แก๊สไฮโดรเจน (H_2), แก๊สไนโตรเจน (N_2), และแก๊สออกซิเจน (O_2) เป็นต้น

จากความหมายของอะตอมและโมเลกุลข้างต้น แสดงให้เห็นว่าอะตอมมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุล การศึกษาถึงลักษณะต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของอะตอม จึงเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก แต่นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามศึกษาเพื่อค้นหาคำตอบในเรื่องดังกล่าว และเมื่อได้รับข้อมูลจะนำมาหาข้อสรุปเกี่ยวกับอะตอมโดยใช้แบบจำลองมาช่วยอธิบาย

3.1 แนวคิดในการพัฒนาแบบจำลองอะตอม

เกือบ 500 ปีก่อนคริสตศักราช นักปราชญ์ชาวกรีก 2 ท่าน นามว่า ดีโมคริตุส (Democritus) และลิวซิปปุส (Leucippus) ได้เสนอแนวคิดว่าเมื่อนำสสารมาแบ่งให้มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จนได้เป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุด จะไม่สามารถแบ่งให้เล็กลงได้อีก เรียกหน่วยย่อยนี้ว่า “อะตอม (Atom)” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกว่า “atomos” แปลว่าแบ่งแยกไม่ได้

จนกระทั่งปี พ.ศ. 2346 จอห์น ดอลตัน ได้เสนอทฤษฎีอะตอม (Atom theory) ขึ้นมา ทำให้การศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างอะตอมแพร่หลายขึ้นตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาจนปัจจุบัน และในปี พ.ศ. 2497 ได้เริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับอะตอมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมาก (รูปที่ 3.1) มาศึกษาอะตอมคาร์บอนในแกรไฟต์ และอะตอมเงินในสารประกอบ

รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)

ที่มา: ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์, 2566

3.2 องค์ประกอบและแบบจำลองอะตอม

แม้ว่าจะสามารถถ่ายภาพของอะตอมได้ แต่ยังไม่สามารถลงรายละเอียดได้มากพอถึงสิ่งที่อยู่ภายในอะตอม ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวองค์ประกอบภายในอะตอมจึงเป็นเพียงการแปลผลที่ได้จากการทดลอง แล้วนำมาสร้างมโนภาพหรือแบบจำลองขึ้นมา และมีการพัฒนาขึ้นเป็นลำดับ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2555) ปัจจุบันมีแบบจำลองอะตอมด้วยกัน 5 แบบ ดังนี้

1) แบบจำลองอะตอมของดอลตัน (Dalton model)

จอห์น ดอลตัน (John Dalton) นักฟิสิกส์และนักเคมีชาวอังกฤษ (รูปที่ 3.2) ที่ได้เสนอทฤษฎีอะตอม และเสนอให้มีการนำรูปภาพมาเป็นสัญลักษณ์แทนชื่อธาตุ เขาเป็นที่รู้จักในฐานะบิดาของ modern physical science โดยทฤษฎีอะตอมมีสาระสำคัญดังนี้

1) สสารทุกชนิดประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กที่สุด ซึ่งไม่สามารถแบ่งแยกได้อีกต่อไป เรียกว่าอะตอม

2) อะตอมของธาตุเดียวกันย่อมมีสมบัติเหมือนกันทุกประการและย่อมมีสมบัติแตกต่างจากอะตอมของธาตุอื่น

3) อะตอมทำให้สูญหายหรือทำให้เกิดขึ้นมาใหม่ไม่ได้

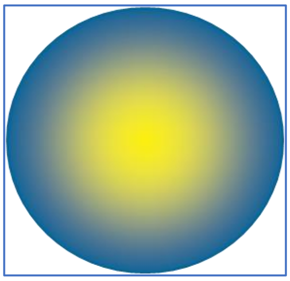
4) สารประกอบเกิดจากการรวมตัวทางเคมีระหว่างอะตอมของธาตุต่างชนิดกัน ด้วยอัตราส่วนของจำนวนอะตอมเป็นตัวเลขลงตัวน้อย ๆ

5) โมเลกุลของสารประกอบชนิดเดี่ยวกันย่อมมรสมบัติเหมือนกันทุกประการ และมีสมบัติต่างจากสารประกอบอื่น

ดังนั้นแบบจำลองอะตอมตามทฤษฎีอะตอมของดอลตัน สรุปได้ดังนี้ อะตอมมีลักษณะเป็นทรงกลมตัน มีขนาดเล็กมาก และไม่สามารถแบ่งแยกได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.2 จอห์น ดอลตัน (John Dalton)

ที่มา : สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2565



รูปที่ 3.3 แบบจำลองอะตอมของดอลตัน

ที่มา : อนุสิษฐ์ เกื้อกูล, 2560

อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีอะตอมของดอลตันก็ยังมีข้อบกพร่องอยู่หลายประการ เช่น จากการศึกษานิวเคลียร์ฟิสิกส์ พบว่าอะตอมประกอบด้วยอนุภาคมูลฐานคือ โปรตอน อิเล็กตรอน และนิวตรอน อะตอมของธาตุชนิดเดียวกันอาจมีคุณสมบัติต่างกันได้ เช่น ธาตุไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป คือ ^1_1H, ^2_1H และ ^3_1H ซึ่งเป็นธาตุชนิดเดียวกันแต่มีมวลต่างกัน เป็นต้น

ทฤษฎีอะตอมของดอลตันสามารถนำมาอธิบายกฎทรงมวลและกฎสัดส่วนคงที่ได้ ดังนี้

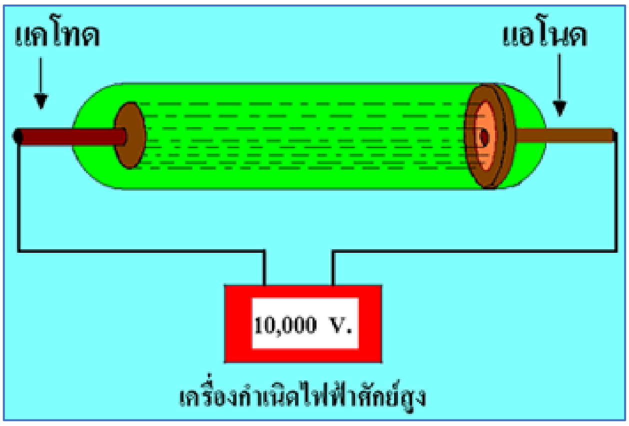
1) การที่ผลรวมของมวลของสารก่อนและหลังปฏิกิริยาเท่ากัน เพราะจำนวนอะตอมไม่ได้สูญหายหรือเกิดขึ้นใหม่ อะตอมอาจแลกที่กันเมื่อเกิดปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2) การที่อัตราส่วนโดยมวลของธาตุที่รวมกันเป็นสารประกอบคงที่นั้น เพราะเมื่ออะตอมของธาตุต่างชนิดมารวมกันเป็นสารประกอบจะรวมกันด้วยอัตราส่วนของจำนวนอะตอมคงที่ และเนื่องจากอะตอมของธาตุชนิดเดียวกันมีสมบัติเหมือนกัน มีมวลเท่ากัน อัตราส่วนโดยมวลของธาตุที่รวมกันเป็นสารประกอบจึงคงที่ด้วย เช่น ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่ว่าจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นกี่โมเลกุลก็ตาม จะพบว่าแต่ละโมเลกุล (molecule) นั้นประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอม ดังนั้นอัตราส่วนโดยมวลของคาร์บอนต่อออกซิเจนจึงมีค่าคงที่

2) แบบจำลองอะตอมของทอมสัน (Thomson model)

เซอร์โจเซฟ จอห์น ทอมสัน นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ (รูปที่ 3.4) ได้ทำการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของก๊าซโดยใช้หลอดรังสีแคโทด แสดงในรูปที่ 3.5

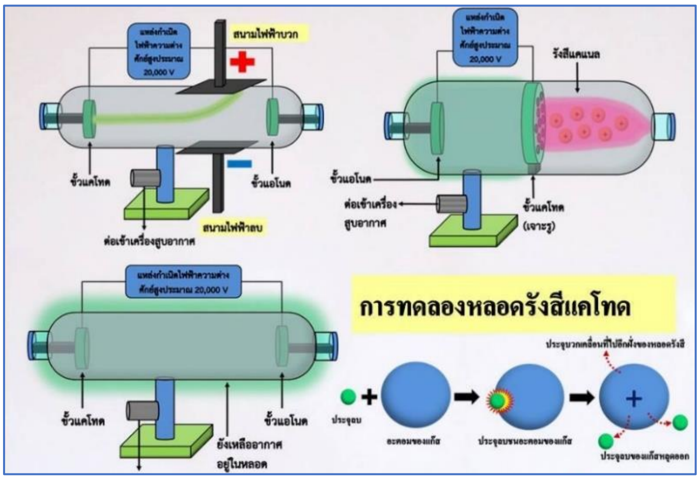
หลอดรังสีแคโทด เป็นเครื่องที่ใช้ทดลองเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าโดยหลอดรังสีแคโทดจะมีความดันต่ำมาก และความต่างศักย์สูงมาก วิลเลียม ครูกส์ (Willium Crooke) ได้สร้างหลอดรังสีแคโทดขึ้นมาโดยใช้แผ่นโลหะ 2 แผ่นเป็นขั้วไฟฟ้า โดยต่อขั้วไฟฟ้าลบ กับขั้วลบ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่า แคโทด (Cathode) และต่อขั้วไฟฟ้าบวกเข้ากับขั้วบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่า แอโนด (Anode)



รูปที่ 3.5 หลอดรังสีแคโทด

ที่มา : เกตุกัญญา สายสาหร่าย, 2566

การค้นพบอิเล็กตรอน เกิดจากการทดลองของ เซอร์ โจเซฟ จอห์น ทอมสัน ที่สนใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในหลอดรังสีแคโทด จึงได้ดัดแปลงหลอดรังสีแคโทดโดยกรเพิ่มฉากเรืองแสง และให้รังสีแคโทดผ่านช่องเล็ก ๆ แล้วให้รังสีแคโทดผ่านสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไปกระทบฉาก โดยให้สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า รังสีจะเบี่ยงเบนขึ้นด้านบน เมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไป และเพิ่มอำนาจสนามแม่เหล็กทีละน้อย จะพบว่ารังสีแคโทดจะเบี่ยงเบนน้อยลง และในที่สุดรังสีแคโทดจะกลับสู่ตำแหน่งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.6



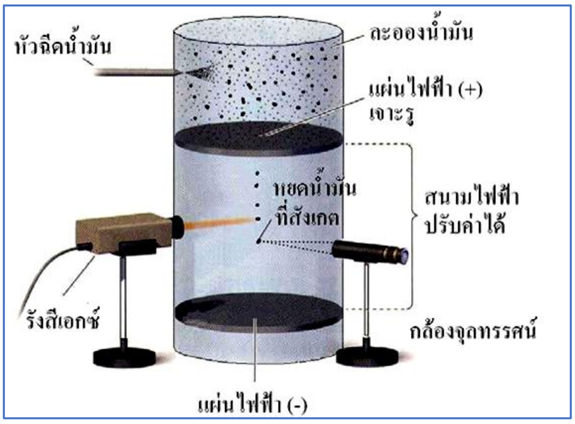
รูปที่ 3.6 การทดลองของทอมสัน

ที่มา : สมศักดิ์ เสนาใหญ่, 2560

จากการทดลองของทอมสัน พบว่ารังสีแคโทดนี้จะเบนเข้าหาขั้วไฟฟ้าบวก ทอมสันจึงสรุปว่า รังสีแคโทด เป็นอนุภาคประจุลบ เรียกอนุภาคนี้ว่า อิเล็กตรอน และสามารถคำนวณหาอัตราของประจุต่อมวล (e/m) ของอิเล็กตรอนได้เท่ากับ 1.78×10^{8} คูลอมบ์ต่อกรัม โดยอาศัยการวัดความโค้งของรังสีแคโทด ต่อมาในปี ค.ศ.1908 มิลลิแกน (R. A. Millikan) (รูปที่ 3.7) ได้ทำการทดลองหาประจุของอิเล็กตรอนโดยใช้หยดน้ำมัน (oil drop experiment) สามารถหาค่าประจุของอิเล็กตรอนได้เท่ากับ 1.60×10^{-19} คูลอมบ์ และสามารถคำนวณหามวลของอิเล็กตรอนได้เท่ากับ 9.11×10^{-31} กิโลกรัม ดังรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.7 รอเบิร์ต แอนดรูส์ มิลลิแกน (Millikan)

ที่มา : สมศักดิ์ เสนาใหญ่, 2560



รูปที่ 3.8 การทดลองของมิลลิแกน

ที่มา : Moore, Stanitski & Jurs, 2002

เมื่อทราบค่าประจุของอิเล็กตรอนจึงสามารถคำนวณหามวลของอิเล็กตรอนได้

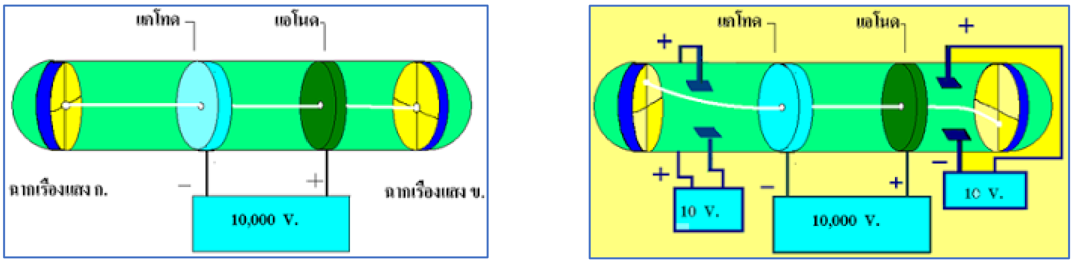
e/m	=	1.76×10^{8}	คูลอมบ์/กรัม
e	=	1.60×10^{-19}	คูลอมบ์

$$m = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.76 \times 10^{8}} \text{ กรัม}$$

$$m = 9.11 \times 10^{-28} \text{ กรัม}$$

$$m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ กิโลกรัม}$$

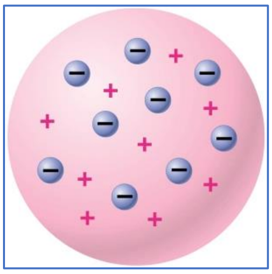
การค้นพบโปรตอน เริ่มจากความรู้ที่ว่าอะตอมเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่การที่พบว่าอะตอมของธาตุทุกชนิดประกอบด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ทำให้นักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าองค์ประกอบอีกส่วนหนึ่งของอะตอม จะต้องมีประจุบวกด้วย ดังนั้น ออยแกน โกลด์สไตน์ (Eugen Goldstein) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน จึงได้ทดลองเกี่ยวกับหลอดรังสีแคโทด โดยดัดแปลงหลอดรังสีแคโทด ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การทดลองของออยแกน โกลสไตน์
ที่มา : อนุสิษฐ์ เกื้อกูล, 2560

จากการทดลองของโกลสไตน์ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า ปรากฏว่ามีจุดสว่างเกิดขึ้นทั้งฉากเรืองแสง ก. และฉากเรืองแสง ข. โกลสไตน์จึงได้อธิบายว่า จุดเรืองแสงที่เกิดขึ้นบนฉากเรืองแสง ก. จะต้องเกิดจากที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก เคลื่อนที่ผ่านรูตรงกลางของแคโทด ไปยังฉากเรืองแสง แต่ยังไม่ทราบว่ารังสีที่มีประจุไฟฟ้าบวกนี้เกิดจากอะตอมของก๊าซ หรือเกิดจากอะตอมของขั้วไฟฟ้า และมีลักษณะเหมือนกันหรือไม่ โกลสไตน์จึงได้ทดลองเปลี่ยนชนิดของก๊าซในหลอดแก้ว ปรากฏว่าอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกเหล่านี้มีอัตราส่วนประจุต่อมวลไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซที่ใช้และเมื่อทดลองเปลี่ยนโลหะที่ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าหลายๆชนิดแต่ให้ก๊าซในหลอดแก้วชนิดเดียวกัน ปรากฏว่า ผลการทดลองได้อัตราส่วนประจุต่อมวลเท่ากันแสดงว่าอนุภาคบวกในหลอดรังสีแคโทดเกิดจากก๊าซไม่ได้เกิดจากขั้วไฟฟ้า

จากผลการทดลอง ทั้งของทอมสันและโกลด์สไตน์ ทำให้ทอมสันได้ข้อมูลเกี่ยวกับอะตอมมากขึ้น จึงได้เสนอแบบจำลองอะตอม ดังนี้ อะตอมมีลักษณะเป็นทรงกลมประกอบด้วยอนุภาคโปรตอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกและอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ กระจัดกระจายอย่างสม่ำเสมอในอะตอม อะตอมที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าจะมีจำนวนประจุบวกเท่ากับจำนวนประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

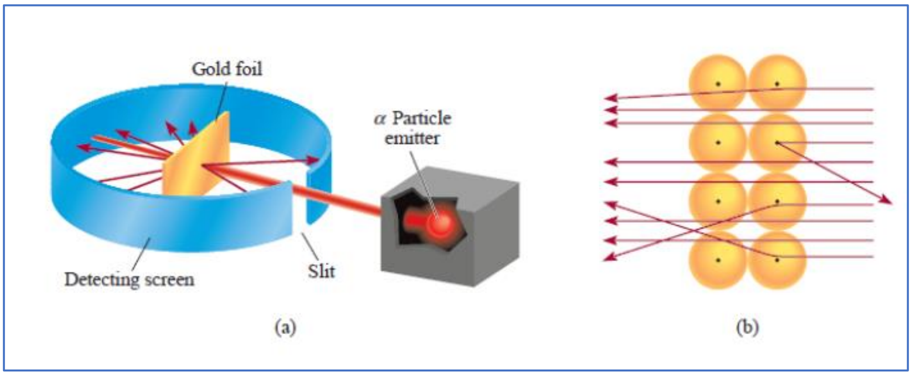
ที่มา : เกตุกัญญา สายสาหร่าย, 2561

3) แบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด (Rutherford model)

ในปี 1910 ลอร์ดเออร์เนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด (รูปที่ 3.11) นักฟิสิกส์ชาวนิวซีแลนด์ ได้ทำการทดลองโดยการยิงอนุภาคแอลฟาไปยังแผ่นทองคำพิสูจน์โครงสร้างของอะตอม โดยทำงานร่วมกันกับ ฮันส์ ไกเกอร์ ดังรูป 3.12 เรียกการทดลองนี้ว่า การทดลองแผ่นฟรอยด์ทองคำ (Gold foil experimental)

รูปที่ 3.11 ลอร์ดเออร์เนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด

ที่มา : อนุสิษฐ์ เกื้อกูล, 2560



รูปที่ 3.12 การทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด

(ก) การทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด (ข) การกระเจิงของอนุภาคแอลฟ่า

ที่มา : Raymond Chang, 2017

จากการทดลอง พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ทะลุผ่านแผ่นโลหะได้โดยไม่มีการเบี่ยงเบนเลย หรือมีการเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นานๆ ครั้งจะมีอนุภาคแอลฟ่าที่กระเจิง (หรือเบี่ยงเบน) ด้วยมุมที่กว้าง บางครั้งก็สะท้อนกลับในทิศทางเดิม ซึ่งเป็นการค้นพบที่น่าอัศจรรย์ เนื่องจากแบบจำลองของทอมสันนั้น อะตอมมีประจุบวกที่กระจายอยู่ทั่วทั้งอะตอม ซึ่งอนุภาคแอลฟ่าควรที่จะวิ่งผ่านไปได้หรือเบี่ยงเบนไปเพียงเล็กน้อยจากทิศทางเดิมเท่านั้น เขากล่าวถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า “เป็นเรื่องที่ไม่น่าเชื่อ พอ ๆ กับการที่คุณยิงกระสุนขนาด 15 นิ้ว ไปบนกระดาษชำระแผ่นหนึ่งแล้วมันสะท้อนกลับมาหาตัวคุณ” แสดงในรูปที่ 3.12 (ก)

จากนั้นรัทเทอร์ฟอร์ดจึงสามารถอธิบายการเกิดภาวะกระเจิงของอนุภาคแอลฟ่าในรูปจำลองของอะตอมแบบใหม่ โดยที่อะตอมส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ว่างอยู่ อธิบายได้จากการที่อนุภาคแอลฟ่าส่วนใหญ่เคลื่อนที่ผ่านแผ่นทองคำบางไปได้โดยไม่มีการเบี่ยงเบนหรือเบี่ยงเบนไปเล็กน้อย สำหรับประจุบวกของอะตอมนั้นรัทเทอร์ฟอร์ดเสนอว่า รวมกันเป็นกลุ่มที่มีความเข้มสูงอยู่ภายในนิวเคลียสจึงเกิดการกระเจิงซึ่งเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงอยู่กึ่งกลางอะตอม เมื่ออนุภาคแอลฟ่าเคลื่อนที่มาใกล้นิวเคลียสจึงเกิดการกระเจิงดังที่ทดลองซึ่งเป็นแรงผลักดันที่มหาศาลทำให้เกิดการเคลื่อนที่สะท้อนกลับได้ แสดงในภาพที่ 2.4 (ข)

จากการทดลองที่แยกกัน พบว่าโปรตอนจะมีจำนวนประจุที่เท่ากับอิเล็กตรอน และมีมวลเท่ากับ 1.67262×10^{-24} กรัม ซึ่งมีค่าประมาณ 1840 เท่าของมวลอิเล็กตรอน

การค้นพบนี้ทำให้รู้ว่าอะตอมมีลักษณะดังนี้ คือ มวลของนิวเคลียสมีค่าเกือบเท่ากับมวลของอะตอมเอง แต่นิวเคลียสมีพื้นที่เพียง $1/10^{13}$ เท่าของปริมาตรอะตอมทั้งอะตอม เราแสดงขนาดของอะตอม (รวมทั้งโมเลกุล) ด้วยหน่วยพิโคเมตร (pm)

$$1 \text{ pm} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}$$

รัศมีของอะตอมทั่วไปมีค่าประมาณ 100 พิโคเมตร โดยรัศมีของนิวเคลียสของอะตอมมีค่าประมาณ 5×10^{-3} พิโคเมตร โปรตอนจะถูกจำกัดบริเวณอยู่ภายในนิวเคลียสของอะตอม ส่วนอิเล็กตรอนจะกระจายตัวอยู่โดยรอบนิวเคลียสด้วยระยะห่างที่คงที่

ต่อมาในปี ค.ศ. 1932 เจมส์ แชดวิก (J. Chadwick) ได้ทำการทดลองยิง (bombard) ธาตุเบริลเลียม (beryllium, Be) ด้วยอนุภาคแอลฟ่า พบว่ามีอนุภาคที่มีพลังงานสูงแต่ไม่มีประจุถูกปลดปล่อยออกมา และ เรียกอนุภาคนี้ว่า “นิวตรอน (neutron)”

จากการค้นพบอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน จึงได้ข้อสรุปว่า อะตอม ประกอบด้วยอนุภาคพื้นฐาน 3 อย่างคือ อิเล็กตรอน (e) โปรตอน (p) และนิวตรอน (n) แสดงสมบัติดังตารางที่ 3.1 โดยบริเวณใจกลางเป็นนิวเคลียสที่มีความหนาแน่นสูงเนื่องจากภายในมีโปรตอนและนิวตรอนมีมวลเกือบเท่ามวลของอะตอมส่วนรอบ ๆ นิวเคลียสจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติอนุภาคมูลฐานของอะตอม

อนุภาค	**ชนิดประจุไฟฟ้า**	**ประจุ(คูลอมบ์)**	**มวล(กรัม)**
อิเล็กตรอน (e)	-	1.6×10^{-19}	9.1096×10^{-28}
โปรตรอน (p)	+	1.6×10^{-19}	1.6726×10^{-24}
นิวตรอน (n)	0	0	1.6749×10^{-24}

จากการศึกษาแบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด ทำให้เกิดการศึกษาเกี่ยวกับนิวเคลียสของอะตอมมากขึ้น โดยมีโปรตอนกับนิวตรอนอยู่ในภายในนิวเคลียส จำนวนโปรตอนมีจำนวนพอดีกับประจุบวกของนิวเคลียสที่เหลือเป็นนิวตรอนมีให้ครบมวล เรียกอนุภาคที่พบในนิวเคลียสว่า “นิวคลีออน (Nucleon)” เนื่องด้วยอะตอมมีประจุโดยรวมเท่ากับศูนย์ หรือเป็นกลางทางไฟฟ้า จึงกล่าวได้ว่าอะตอมมีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนนั่นเอง

3.1) เลขอะตอม เลขมวล และสัญลักษณ์นิวเคลียร์

จำนวนโปรตอนภายในนิวเคลียสเรียกว่า “เลขอะตอม (atomic number)” แทนด้วย Z หรือค่าประจุในนิวเคลียส (Nuclear charge) เป็นเลขที่เป็นค่าเฉพาะตัวของธาตุแต่ละธาตุและไม่ซ้ำกับธาตุอื่น ธาตุชนิดเดียวกันจึงมีเลขอะตอมเท่ากัน ธาตุต่างชนิดกันมีเลขอะตอมต่างกัน ในกรณีของอะตอมที่ไม่เป็นกลาง อาจเรียกว่า “ไอออน (ion)” ซึ่งอาจเป็นไอออนบวก (cation) หรือ ไอออนลบ (anion) ลักษณะธาตุยังเป็นธาตุชนิดเดิม เลขอะตอมเท่าเดิม จำนวนโปรตอนเท่าเดิม จำนวนที่เปลี่ยนแปลงไปคือจำนวนอิเล็กตรอน

จำนวนนิวตรอน สามารถหาได้จาก “เลขมวล (mass number)” แทนด้วย A ซึ่งเลขมวลเป็นตัวเลขใช้บอกมวลอะตอมของนิวเคลียส ซึ่งหมายถึงมวลของโปรตอนและมวลของนิวตรอนนั่นเอง หรือเป็นตัวเลขที่ใช้บอกจำนวนโปรตอนและจำนวนนิวตรอนรวมกัน ทั้งเลขอะตอมและเลขมวลของอะตอมสามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์นิวเคลียร์ (nuclear symbol)

$$^{A}_{Z}X$$

โดย	X	คือ	สัญลักษณ์ของธาตุ
	A	คือ	เลขมวล
	Z	คือ	เลขอะตอม

จากสัญลักษณ์นิวเคลียร์ของธาตุ สามารถคำนวณจำนวนนิวตรอนของธาตุได้

จำนวนนิวตรอน = เลขมวล - เลขอะตอม

$$n = A - Z$$

3.2) ไอโซโทป ไอโซโทน และไอโซบาร์

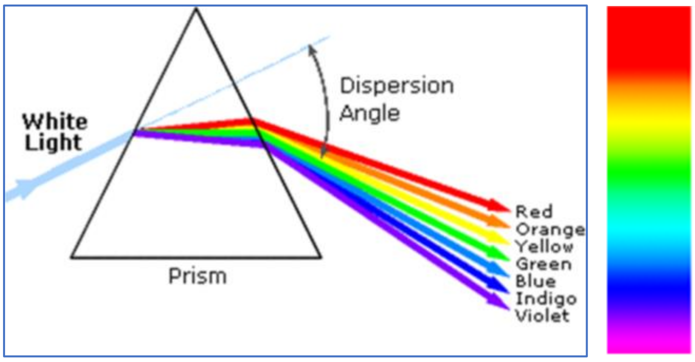
ไอโซโทป (Isotope) หมายถึง อะตอมของธาตุเดียวกันที่มีเลขอะตอมเท่ากันแต่มีเลขมวลต่างกัน อะตอมของธาตุเดียวกัน มีสัญลักษณ์ธาตุเหมือนกัน มีจำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่จำนวนนิวตรอนต่างกัน ธาตุหนึ่ง ๆ อาจมีได้หลายไอโซโทป เช่น ธาตุไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป มีสัญลักษณ์นิวเคลียร์ดังนี้ ${}^{1}_{1}H$, ${}^{2}_{1}H$และ ${}^{3}_{1}H$เป็นต้น

ไอโซโทน (Isotone) หมายถึง ธาตุต่างชนิดกันที่มีจำนวนนิวตรอนเท่ากัน เช่น ${}^{39}_{19}K$ และ ${}^{40}_{20}Ca$ เป็นต้น

ไอโซบาร์ (Isobar) หมายถึง ธาตุต่างชนิดกันที่มีเลขมวลเท่ากัน เช่น ${}^{14}_{6}C$ และ ${}^{14}_{7}N$ เป็นต้น

4) แบบจำลองอะตอมของโบร์

นีล โบร์ นักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์ก ได้พิจารณาโครงสร้างอะตอมตามแนวคิดของรัทเทอร์ฟอร์ดร่วมกับการเกิดสเปกตรัมของธาตุ และพลังงานไอออไนเซชัน (Ionization Energy) โดยอาศัยความรู้พื้นฐานเรื่องสเปกตรัมอะตอม ดังนี้ เมื่อให้แสงสีขาวผ่านช่องเล็กๆ (slit) แล้วให้ผ่านปริซึมจะปรากฏเป็นแถบแสงของสีรุ้งบนฉาก (ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และแดง) ดังรูปที่ 3.13 แถบแสงที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสามารถมองเห็นได้ตาเปล่า จึงเรียกว่า “สเปกตรัมแสงที่มองเห็นได้ (visible spectrum)” โดยสเปกตรัมประเภทนี้จัดเป็นสเปกตรัมชนิดต่อเนื่อง (continuous spectrum) (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558)

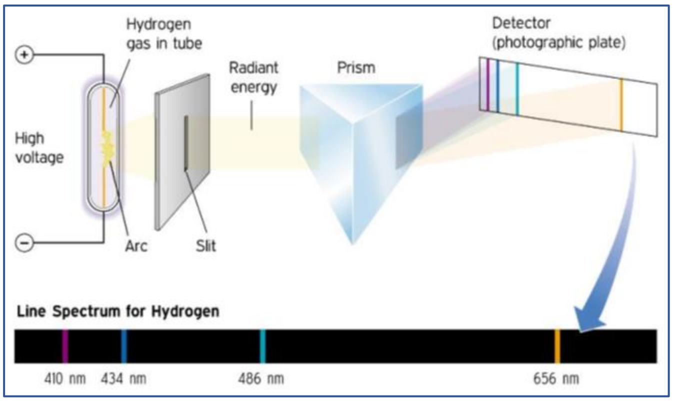


รูปที่ 3.13 สเปกตรัมแบบต่อเนื่อง

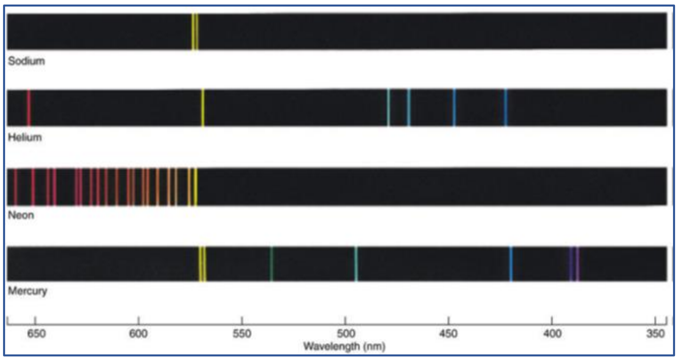
ที่มา : โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สตรีวิทยา พุทธมณฑล, 2555

แต่ถ้าแสงที่เกิดจากการเปล่งรังสีจากอะตอมของธาตุในหลอดปล่อยประจุ (discharge tube) สเปกตรัมที่ได้จะไม่เป็นสเปกตรัมชนิดต่อเนื่อง เช่นแสงที่เปล่งจากหลอดปล่อยประจุที่บรรจุแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen, H) จะปรากฏเป็นเส้นๆ บนฉากรับภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.14(ก) เรียกสเปกตรัมประเภทนี้ว่า

สเปกตรัมเส้น (line spectrum) หรือ สเปกตรัมอะตอม (atomic spectrum) โดยที่สเปกตรัมอะตอมจะเป็นสมบัติเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ ธาตุต่างชนิดกันจะมีสเปกตรัมอะตอมที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.14(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.14 สเปกตรัมแบบเส้น

(ก) สเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน (ข) สเปกตรัมของโซเดียม ฮีเลียม นีออนและปรอท

ที่มา : Silberberg. Principle of General Chemistry, 2013

จากการทดลองพบว่า แก๊ส H_2 เปล่งแสงมองเห็นได้คือ สีม่วง (λ=410 nm) สีน้ำเงิน (λ =434 nm) สีเขียว (λ =486 nm) และสีแดง (λ =656 nm) ดังรูปที่ 3.14(ก) เนื่องจากอิเล็กตรอนที่อยู่รอบอะตอมของแก๊ส H_2 ได้รับพลังงานสูงอิเล็กตรอนเหล่านี้จึงถูกกระตุ้นโดยเปลี่ยนจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) และเมื่ออิเล็กตรอนกลับคืนสู่สถานะพื้นจึงคายพลังงานส่วนที่เกินออกมาในรูปของรังสีที่ปรากฏบนฉากรับภาพเป็นเส้น เรียกลักษณะการคายพลังงานออกมาเป็นเส้นว่า “สเปกตรัมเปล่งออก (emission spectrum)” ซึ่งธาตุแต่ละชนิดจะมีลักษณะสเปกตรัมอะตอมที่มีลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า สเปกตรัมอะตอมเป็นสมบัติเฉพาะของแต่ละธาตุ โดยธาตุต่างชนิดกันจะปรากฏความยาวคลื่นของสเปกตรัมอะตอมต่างกันตัวอย่างสเปกตรัมอะตอม H ที่แสดงในรูปที่

3.14(ก) เป็นสเปกตรัมที่ปรากฏในย่านแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือย่านวิสิเบิล (visible) อย่างไรก็ตาม อะตอม H ยังสามารถเปล่งแสงในย่านอินฟราเรด (infrared) และย่านอัลตราไวโอเลต (ultraviolet) ได้ด้วย แต่ในย่านทั้งสองนี้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

จากความรู้ที่ได้ โบร์ได้เสนอแบบจำลองของอะตอม H โดยสามารถอธิบายพฤติกรรมของอิเล็กตรอนและสามารถคำนวณระดับพลังงานต่างๆ ทำให้สามารถอธิบายการเกิดสเปกตรัมอะตอมของ H ได้เป็นอย่างดีแบบจำลองอะตอมของโบร์ สรุปได้คือ อะตอมประกอบนิวเคลียสที่มีประจุไฟฟ้าบวกและมีอิเล็กตรอนโคจรอยู่รอบๆ นิวเคลียส โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสเป็นวงคล้ายกับวงโคจรของดาวเคราะห์รอบดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3.15 แต่ละวงจะมีระดับพลังงานเฉพาะตัว ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้นิวเคลียสที่สุด จะมีพลังงานต่ำที่สุด เรียกว่าระดับ K (K-shell) และระดับพลังงานที่อยู่ถัดออกไปเรียกเป็น L M N ....∞ ตามลำดับ ต่อมาได้มีการใช้ตัวเลขแสดงระดับพลังงานของวงโคจรอิเล็กตรอน คือ

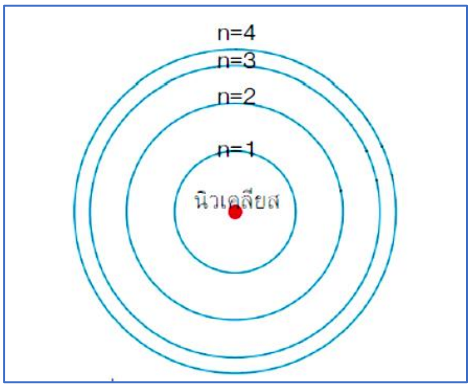
$n = 1$ หมายถึงระดับพลังงานที่ 1 หรือ เชลล์ K

$n = 2$ หมายถึงระดับพลังงานที่ 2 หรือ เชลล์ L

$n = 3$ หมายถึงระดับพลังงานที่ 3 หรือ เชลล์ M

$n = 4$ หมายถึงระดับพลังงานที่ 4 หรือ เชลล์ N

ตามแบบจำลองอะตอมของโบร์ระบุตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบนิวเคลียสมีรัศมีห่าง 52.9 พิโกเมตร (pm)



รูปที่ 3.15 แบบจำลองอะตอมของโบร์

ที่มา : Petrucci, Harwood & Herring, 2002

5) แบบจำลองอะตอมในแบบกลศาสตร์เชิงคลื่น

จากทฤษฎีอะตอมของโบร์ระบุการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นวงกลม แต่ในภายหลังพบว่าไม่ถูกต้องและมีข้อบกพร่อง เพราะไม่สามารถใช้อธิบายกับอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมากกว่าหนึ่งอิเล็กตรอนได้ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อซอมเมอเฟลด์(Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld) เสนอว่าวงโคจร

ของอิเล็กตรอนไม่ได้เป็นวงกลมเพียงอย่างเดียว แต่อาจเป็นวงรีด้วย ซึ่งสามารถอธิบายความแตกต่างของเสถียรภาพของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานเดียวกันได้

ในปี ค.ศ.1924 เดอ เบรย (Louis Victor DeBroglie) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้เสนอแนวคิดเพื่ออธิบายพลังงานเฉพาะของอิเล็กตรอนในอะตอม โดยเสนอว่า ถ้าพลังงานมีสมบัติเป็นอนุภาค (particle)ได้ สสารก็มีสมบัติเป็นคลื่น (wave) ได้เช่นกัน เดอ เบรย ให้เหตุผลว่าถ้าอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่เสมือนคลื่นในวงโคจรที่มีรัศมีคงที่ อิเล็กตรอนควรมีความถี่และพลังงานที่แน่นอน โดย เดอเบรยเปรียบเทียบสมการของไอน์สไตน์และสมการของพลังค์ ทำให้ได้สมการที่ 3.1

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$ ------------------------------------- สมการที่ 3.1

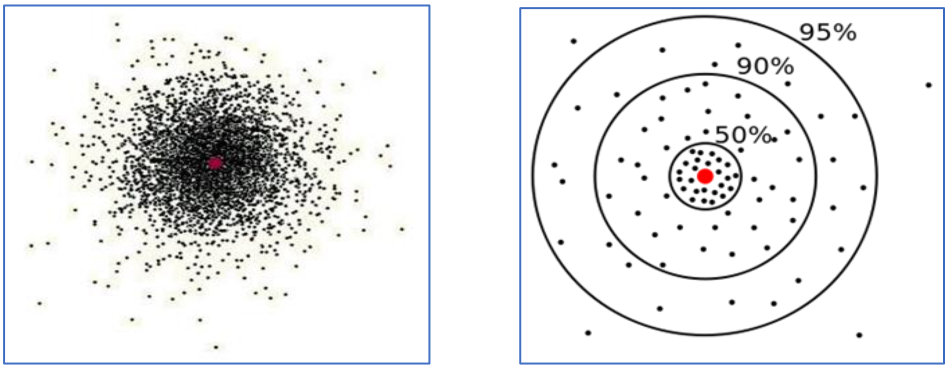
จากสมการที่ 3.1 นั่นคือค่าความยาวคลื่นเดอ เบรย (de Brogile wavelength) สามารถคำนวณหาความยาวคลื่นของอนุภาคที่มีมวล (m) และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v) ได้และสามารถสรุปได้ว่า อนุภาคสามารถแสดงสมบัติเป็นคลื่นได้เช่นกัน จากสมการเดอ เบรย แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับโมเมนตัม จะเห็นได้ว่า ถ้าวัดค่า λ ได้แม่นยำ จะทำให้วัดค่าโมเมนตัมได้แม่นยำด้วย แต่ถ้าวัดค่า λ ผิดพลาด จะทำให้ค่าโมเมนตัมผิดพลาดไปด้วย

ในปี ค.ศ.1927 ไฮเซนเบิร์ก (Werner Heisenberg) ทำการทดลอง เพื่อวัดตำแหน่งของอิเล็กตรอน ซึ่งไฮเซนเบิร์ก สรุปจากสมบัติความเป็นคลื่นของอิเล็กตรอนว่า “ไม่มีโอกาสที่จะระบุตำแหน่งและโมเมนตัม ของอนุภาคได้อย่างแม่นยำพร้อมกันในเวลาเดียวกัน” เรียกหลักการว่า “หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg’s uncertainty principle)” หลักการนี้ขยายความได้คือ หากสามารถวัดตำแหน่งอนุภาคได้แม่นยำ จะไม่มีทางบอกตำแหน่งของโมเมนตัมได้ ในทางกลับกันถ้าหากสามารถระบุค่าโมเมนตัมได้อย่างแม่นยำ จะไม่มีทางหาตำแหน่งของอนุภาคได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นถ้าวัดตำแหน่งผิดพลาดไปมาก (ความไม่แน่นอนในการวัดมีค่ามาก) จะวัดค่าโมเมนตัมผิดพลาดน้อย แต่ถ้าวัดตำแหน่งผิดพลาดน้อย (ความไม่แน่นอนในการวัดมีค่าน้อย) จะวัดค่าโมเมนตัมผิดพลาดมาก ไฮเซนเบิร์กสรุปว่าไม่ว่าจะวัดปริมาณทั้งสองได้ค่าผิดพลาด อย่างไรก็ตาม ค่าความไม่แน่นอนในการวัดปริมาณทั้งสองคูณกันแล้วต้องได้ค่าคงที่ตัวหนึ่ง และค่าคงที่ตัวนั้นต้องไม่น้อยกว่าค่าคงที่ของพลังค์

ในปี ค.ศ.1926 ชเรอดิงเงอร์ (Erwin Schrodinger) นักฟิสิกส์ชาวออสเตรีย ได้อาศัยแนวคิดของเดอ เบรย คืออนุภาคแสดงสมบัติเป็นคลื่นได้ ดังนั้น ถ้าอิเล็กตรอนเป็นอนุภาค แต่ประพฤติตัวแบบคลื่นได้ก็ควรจะมีสมการการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับคลื่นชเรอดิงเงอร์สามารถเขียนสมการคลื่น (wave equation) โดยแทนอิเล็กตรอนด้วยกลุ่มคลื่นและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วกลุ่มที่เท่ากับความเร็วของอนุภาค ซึ่งเป็นหลักการทางกลศาสตร์คลื่นมาอธิบายโครงสร้างของอะตอม H และอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมากกว่าหนึ่งอิเล็กตรอนได้ ชเรอดิงเงอร์แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นไปในลักษณะคลื่นซึ่งจะมีสามมิติ สมการคลื่นและวิธีการแก้สมการชเรอดิงเงอร์ ต้องใช้วิธีโดยประมาณ วิธีการแก้ยุ่งยากและ

สลับซับซ้อนมาก ปัจจุบันสมการ ชเรอดิงเงอร์ได้กลายเป็นการศึกษาทางด้านฟิสิกส์สาขาหนึ่งที่เรียกว่า กลศาสตร์คลื่น (wave mechanics) หรือควอนตัมแมคคานิก (quantum mechanics) สมการของชเรอดิงเงอร์เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่เป็นคณิตศาสตร์ชั้นสูง การแก้สมการชเรอดิงเงอร์ จะต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยาก แต่ผลลัพธ์ของการแก้สมการชเรอดิงเงอร์ทำให้เกิดอนุกรมของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันคลื่น (wave function)”แทนสัญลักษณ์ ψ มาจากอักษรกรีกอ่านว่า ไซ (Psi) โดยค่ากำลังสองของฟังก์ชันคลื่น (ψ^2) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับบริเวณของอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานที่เป็นไปได้และบอกได้ว่าบริเวณใดบ้างที่มีโอกาสจะพบอิเล็กตรอนสูงสุดหรือมีความหนาแน่นของประจุลบมากที่สุด บริเวณที่มีโอกาสจะพบอิเล็กตรอนสูงสุดเรียกว่า ออร์บิทัลเชิงอะตอม (atomic orbital)

ผลลัพธ์ของการแก้สมการชเรอดิงเงอร์สามารถอธิบายค่าตัวแปรต่างๆ ในสถานะคงที่ตามทฤษฎีของโบร์ เช่น ตามแบบจำลองอะตอมของโบร์ระบุตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบนิวเคลียสมีรัศมีห่าง 52.9 พิโกเมตร (pm) แต่จากการแก้สมการชเรอดิงเงอร์แสดงให้เห็นว่าจะสามารถพบอิเล็กตรอนได้ทุกบริเวณในอะตอม แต่บริเวณที่น่าจะมีโอกาสพบอิเล็กตรอนได้มากที่สุดหรือหนาแน่นที่สุดจะอยู่ที่ระยะห่างจากนิวเคลียส 52.9 พิโกเมตร จากแนวคิดดังกล่าวนี้ทำให้แบบจำลองอะตอมตามสมการชเรอดิงเงอร์จะเป็นเหมือนกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน (electron cloud) ที่โคจรล้อมรอบนิวเคลียส ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 อิเล็กตรอนแบบกลุ่มหมอกและโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอน

ที่มา : Richard Parsons, 2009

3.3 เลขควอนตัม

เมื่อแก้สมการของชเรอดิงเงอร์จะพบว่าตำแหน่งและพลังงาน ของอิเล็กตรอนในอะตอมจะเกี่ยวข้องกับเลขควอนตัม (quantum number) 3 แบบ ส่วนเลขควอนตัมชนิดที่ 4 คือเลขควอนตัมสปิน ซึ่งใช้ระบุพฤติกรรมของอิเล็กตรอนหนึ่งๆ ที่ครอบครองในออร์บิทัล เลขควอนตัมทั้ง 4 ชนิดประกอบด้วย (กฤษณา ชุติมา, 2556)

1) เลขควอนตัมหลัก (principal quantum number, n)

เลขควอนตัมหลักเป็นเลขที่แสดงระดับพลังงานหลัก หรือแสดงถึงระยะห่างจากนิวเคลียสและระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (หรือเรียกว่า shell) โดย n มีค่า 1 2 3.... โดยถ้า n=1 จะอยู่ใกล้นิวเคลียสมากที่สุดและมีพลังงานต่ำที่สุดซึ่งก็สอดคล้องกับ n ตามทฤษฎีของโบร์

2) เลขควอนตัมเชิงมุม (angular momentum quantum number, l)

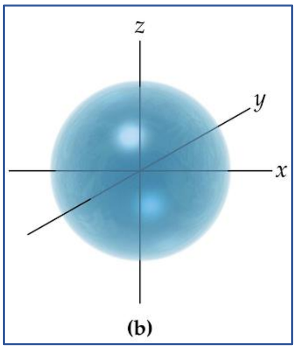
เลขควอนตัมเชิงมุมหรือเลขควอนตัมแอซิมุธ (azimuthal quantum number) เลขควอนตัมนี้จะสัมพันธ์อยู่กับโมเมนตัมเชิงมุมหรือ รูปร่างวงโคจรของอิเล็กตรอน หรือบริเวณที่จะพบอิเล็กตรอนหรือออร์บิทัล (orbital) โดย l จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง n-1 โดยค่า l สูงจะมีโมเมนตัมเชิงมุมและพลังงานสูง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.17 (ก) – (ง)

ตารางที่ 3.2 การคำนวณค่า l และรูปร่างออร์บิทัลต่าง ๆ

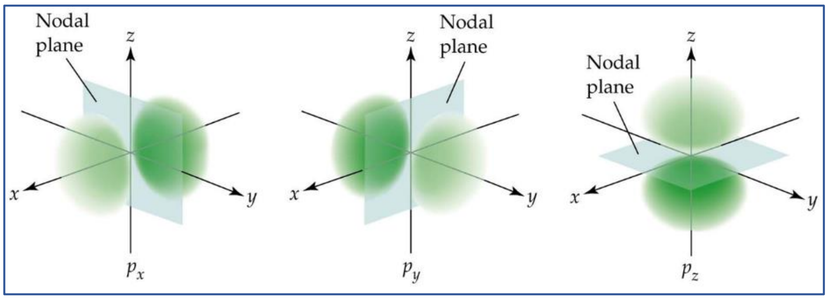
ระดับพลังงานหลัก (n)	ค่า l (l = n – 1)	ชนิดออร์บิทัล	รูปร่างออร์บิทัล
1	0	0 = s	ทรงกลม
2	0, 1	1 = p	Lope 2 lope
3	0, 1, 2	2 = d	Lope 4 lope
4	0, 1, 2, 3	3 = f	Lope 6 lope

3) เลขควอนตัมแม่เหล็ก (magnetic quantum number, m_l)

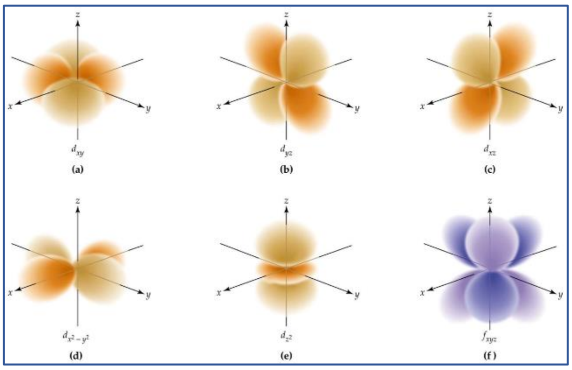
เลขควอนตัมแม่เหล็กเป็นเลขควอนตัมที่สัมพนธ์กับทิศทางของออร์บิทัลในช่องว่างภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กโดย m_l จะมีค่าตั้งแต่ -l ถึง l+ หรือ 2l+1 ค่า ซึ่งมีระดับพลังงานเท่ากันเรียกว่าสภาพซ่อนสถานะ (degeneracy) ดังแสดงในตารางที่ 3.3

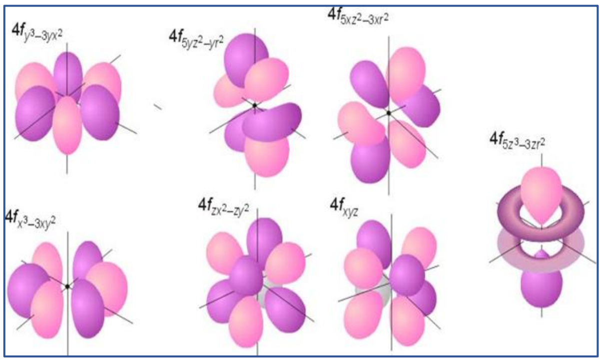


(ก)



(ข)





(ค) (ง)

รูปที่ 3.17 รูปร่างของออร์บิทัล s - ออร์บิทัล f

(ก) s orbital (ข) p orbitals (ค) d orbitals (ง) f orbitals

ที่มา : โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ, 2555

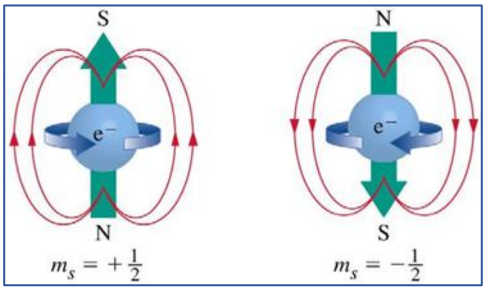
ตารางที่ 3.3 การแปลผลค่าเลขควอนตัมแม่เหล็ก m_l

n	l	m_l (m_l = 2l + 1)	Orbital Notation	Number of Orbitals in subshell	Number of Orbitals in Shell
1	0	0	1s	1	1s
2	0	0	2s	1	2s
	1	-1, 0, +1	2p	3	2px 2py 2pz
3	0	0	3s	1	3s
	1	-1, 0, +1	3p	3	3px 3py 3pz
	2	-2, -1, 0, +1, +2	3d	5	$3d_{xy}$ $3d_{yz}$ $3d_{xz}$ $3d_{x^2-y^2}$ 3_{dz^2}
4	0	0	4s	1	4s
	1	-1, 0, +1	4p	3	4px 4py 4pz
	2	-2, -1, 0, +1, +2	4d	5	$4d_{xy}$ $4d_{yz}$ $4d_{xz}$ $4d_{x^2-y^2}$ $4d_{x^2}$
	3	-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3	4f	7	$4f_{y(3x^2-y^2)}$ $4f_{z(x^2-y^2)}$ $4f_{yz^2}$ $4f_{z^3}$ $4f_{xz^2}$ $4f_{xyz}$ $4f_{x(x^2-3y^2)}$

นอกจากเลขควอนตัมทั้ง ในตารางที่ 3.3 แล้วพอล ดิเรก (Pual Dirac)ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจนสามารถสรุปได้ว่าเลขควอนตัมที่เกี่ยวข้องควรจะมีทั้งหมด4ชนิดคือจะ ต้องมีเลขควอนตัมสปิน (spin quantum number) ด้วย

4) เลขควอนตัมสปิน (spin quantum number, m_s)

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเมื่อหมุนรอบตัวเองจะมีพฤติกรรมเหมือนเป็นแท่งแม่เหล็กเล็กๆ ซึ่งมีปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กมี 2 แบบ คือ +1/2 กับ -1/2 ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การสปินของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

ที่มา : Petrucci, Harwood & Herring, 2002

3.4 โครงแบบอิเล็กตรอน

โครงแบบอิเล็กตรอนของอะตอม (electron configuration) คือการบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลเชิงอะตอมที่สัมพันธ์กับเลขควอนตัม 4 ชนิด โครงแบบอิเล็กตรอนจะช่วยอธิบายบริเวณหรือตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่ครอบครองภายในอะตอมนั้นๆ ในการบรรจุอิเล็กตรอนแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานหลักและการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย โดยการบรรจุอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยมีรูปแบบการเขียน 2 แบบ ดังนี้

แบบที่ 1 ใช้สัญลักษณ์ □ แทนจำนวนออร์บิทัลเชิงอะตอม (เปรียบเสมือนห้องที่จะให้อิเล็กตรอนครอบครองอยู่) อาจใช้สัญลักษณ์เครื่องหมายขีด (___) หรือสัญลักษณ์วงกลม (○) แสดงประเภทและจำนวนออร์บิทัลเชิงอะตอมก็ได้ จำนวนออร์บิทัลเชิงอะตอมในแต่ละระดับพลังงานเป็นตามเลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม เช่น

ออร์บิทัล-s ในระดับพลังงานใดๆ จะมีทั้งหมด 1 ออร์บิทัลย่อย □

ออร์บิทัล-p ในระดับพลังงานใดๆ จะมีทั้งหมด 3 ออร์บิทัลย่อย □□□

ออร์บิทัล-d ในระดับพลังงานใดๆ จะมีทั้งหมด 5 ออร์บิทัลย่อย □□□□□

ออร์บิทัล-f ในระดับพลังงานใดๆ จะมีทั้งหมด 7 ออร์บิทัลย่อย □□□□□□□

แบบที่ 2 เขียนเป็นตัวเลขและตัวอักษร แสดงชนิดของออร์บิทัล (s, p, d, f, ...) และจำนวนอิเล็กตรอนในออร์บิทัล เช่น $1s^2$ (มีอิเล็กตรอน 2 ตัวใน 1s-orbital) $2p^6$ (มีอิเล็กตรอน 6 ตัวใน 2p-orbital คือ px^2, py^2, pz^2) เป็นต้น

นอกจากสัญลักษณ์แล้ว การบรรจุอิเล็กตรอนลงในระดับพลังงานย่อยต้องอาศัยกฎเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้ (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558:30)

1) หลักการกีดกันเพาลี (Pauli exclusion principle)

เพาลี (Wolfgang Pauli, ค.ศ.1925) นักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรียได้เสนอหลักที่เรียกว่าหลักการกีดกันเพาลี โดยมีความสำคัญว่า “ในอะตอมหนึ่งๆ จะมีอิเล็กตรอนคู่หนึ่งคู่ใดที่มีเลขควอนตัมทั้ง 4 ชนิด (n l m_l และ m_s) เหมือนกันไม่ได้” นั่นคืออิเล็กตรอนคู่หนึ่งในออร์บิทัลจะมีค่า n, l และ m_l เหมือนกันได้แต่การหมุนของอิเล็กตรอนต้องไม่เหมือนกัน (อาจสรุปได้ว่าในแต่ละออร์บิทัลย่อยของแต่ละระดับพลังงานจะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้เป็นคู่ที่มีการหมุนตรงกันข้ามเท่านั้น)

2) หลักเกณฑ์ของฮุนด์ (Hund's rule)

ฮุนด์ (Friedrich Hund) นักเคมีชาวเยอรมัน ระบุว่า “การบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานเท่ากัน จะต้องบรรจุในลักษณะที่ทำให้มีอิเล็กตรอนเดี่ยวมากที่สุดเท่าที่จะมากได้” ตัวอย่างการจัดเรียงอิเล็กตรอนของอะตอมคาร์บอน C ซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 6 เป็น $1s^2$ $2s^2$ $2p^2$ ซึ่งสามารถแสดงการจัดเรียงแผนภาพออร์บิทัลเชิงอะตอมในออร์บิทัล-2p ได้ 3 แบบดังนี้

$2p_x$ $2p_y$ $2p_z$

(ก)

$2p_x$ $2p_y$ $2p_z$

(ข)

$2p_x$ $2p_y$ $2p_z$

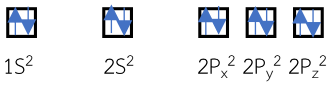
(ค)

ซึ่งการบรรจุอิเล็กตรอนทั้ง 3 แบบไม่ขัดต่อการจัดตามหลักการกีดกันเพาลี แต่เมื่อพิจารณาความเสถียรตามหลักเกณฑ์ของฮุนด์แล้วพบว่าการจัดแบบ (ค) สอดคล้องมากที่สุด กล่าวคือมีอิเล็กตรอนเดี่ยวในระดับพลังงานเดียวกันมากที่สุด

ตัวอย่างการจัดเรียงอิเล็กตรอนของ N ซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 7 เป็น $1s^2$ $2s^2$ $2p^3$ ดังนั้นอิเล็กตรอนในออร์บิทัล- 2p จึงเป็นอิเล็กตรอนเดี่ยวทั้งหมด ดังนี้

$1S^2$ $2S^2$ $2P_x^1$ $2P_y^1$ $2P_z^1$

ตัวอย่างการจัดเรียงอิเล็กตรอนของ Ne ซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 10 เป็น $1s^2$ $2s^2$ $2p^6$ ดังนั้นอิเล็กตรอนในออร์บิทัล-2p จึงเป็นอิเล็กตรอนแบบเข้าคู่ทั้งหมด ดังนี้

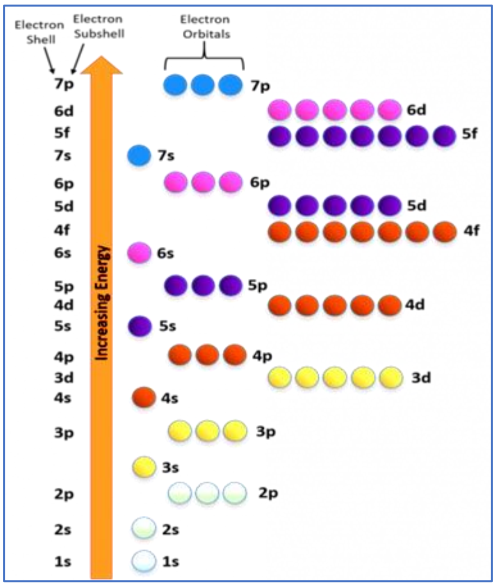


$1S^2$ $2S^2$ $2P_x^2$ $2P_y^2$ $2P_z^2$

3) หลักของเอาฟบาว (Aufbau principle)

หลักของเอาฟบาว คือ ต้องบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานต่ำให้เต็มก่อน แล้วจึงบรรจุในระดับพลังงานที่สูงขึ้นไปเมื่อระดับพลังงานต่ำกว่าเต็มแล้ว

หลักของเอาฟบาวสอดคล้องกับการจัดเรียงอิเล็กตรอนตามระดับพลังงานตามเลขควอนตัมโดยให้พิจารณาการจัดเรียงตามรูปที่ 3.19



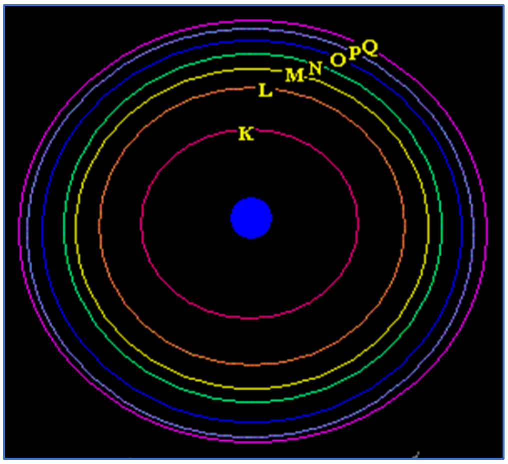
รูปที่ 3.19 ระดับพลังงานออร์ทัลอะตอม

ที่มา : CH150 CHAPTER 2 ATOMS AND PERIODIC TABLE, 2017

3.5 การจัดเรียงอิเล็กตรอน

1) การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานหลัก

การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานหลัก เป็นการศึกษาสืบเนื่องจากแบบจำลองอะตอมของนีลส์ โบร์ เชื่อว่าอิเล็กตรอนที่วิ่งอยู่รอบๆนิวเคลียสนั้น จะอยู่กันเป็นชั้นๆตามระดับพลังงาน ระดับพลังงานที่อยู่ใกล้นิวเคลียสที่สุด (ชั้น K)จะมีพลังงานต่ำที่สุด และอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้นถัดออกมาจะมีพลังงานสูงขึ้นๆตามลำดับพลังงานของอิเล็กตรอนของระดับชั้นพลังงาน K < L < M < N < O < P < Q หรือชั้นที่ 1< 2 < 3 <4 < 5 < 6 < 7 ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แบบจำลองอะตอมของนีลส์ โบร์

ที่มา : CH150 CHAPTER 2 ATOMS AND PERIODIC TABLE, 2017

จากการศึกษาพบว่าอิเล็กตรอนอยู่กันเป็นชั้นๆ ในระดับพลังงานต่างๆ โดยจำนวนอิเล็กตรอนมีได้มากที่สุดในแต่ละระดับพลังงานไม่เกิน $2n^2$ เมื่อ n คือ เลขแสดงระดับพลังงานหลัก ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนที่มีมากสุดในแต่ละระดับพลังงานหลัก แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 จำนวนอิเล็กตรอนที่มีมากสุดในแต่ละระดับพลังงานหลัก

ระดับพลังงาน	เชลล์	จำนวนอิเล็กตรอนที่มีได้มากที่สุด
n = 1	K	$2x1^2 = 2$
n = 2	L	$2x2^2 = 8$
n = 3	M	$2x3^2 = 18$
n = 4	N	$2x4^2 = 32$

หลักในการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานหลัก มีหลักการสำคัญเพียง 2 ข้อนั่นคือ

1) อิเล็กตรอนจะสามารถบรรจุอยู่ในแต่ละระดับพลังงานได้ไม่เกิดจำนวนอิเล็กตรอนที่มีได้มากสุดในแต่ละระดับพลังงาน เมื่อแต่ละชั้นบรรจุอิเล็กตรอนในจำนวนที่มากสุดแล้ว อิเล็กตรอนตัวต่อไปจะขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น

2) เมื่อมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนจนถึงระดับพลังงานสุดท้าย อิเล็กตรอนที่สามารถอยู่ในระดับพลังงานชั้นสุดท้ายมีได้มากสุดจำนวน 8 อิเล็กตรอน

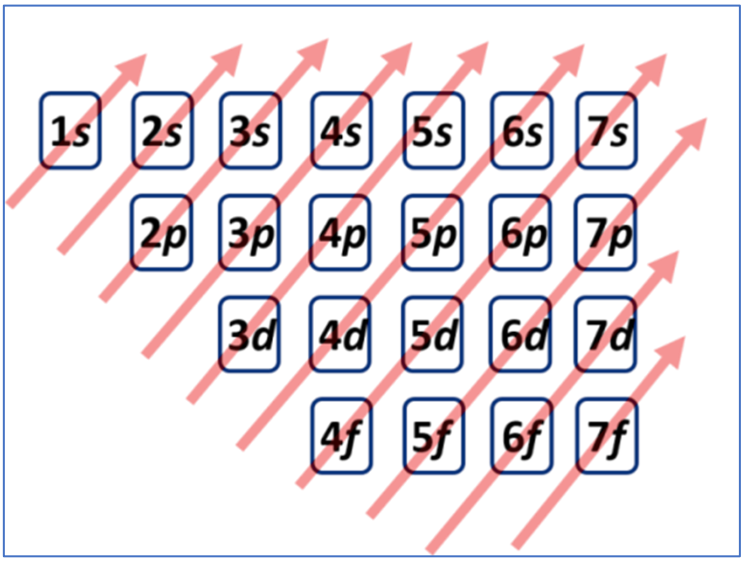
ตัวอย่าง การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานหลัก

คาร์บอน, C	มีเลขอะตอม 6	การจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นดังนี้	2	4				
แคลเซียม, Ca	มีเลขอะตอม 20	การจัดเรียงอิเล็กตรอน เป็นดังนี้	2	8	8	2		
ไอโอดีน, I	มีเลขอะตอม 53	การจัดเรียงอิเล็กตรอน เป็นดังนี้	2	8	18	18	7	

2) การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย

ในระดับพลังงานหลัก ยังมีระดับพลังงานย่อย (sub-shell level) ตามเลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม ที่เรียกว่าระดับ s p d และ f (ยกเว้นระดับพลังงานที่ 1 ที่มีระดับพลังงานเพียงระดับเดียว) โดยการจัดเรียงอิเล็กตรอนจะเรียงลำดับจากค่าระดับพลังงานต่ำไปพลังงานสูง ลำดับระดับพลังงานเรียงจากต่ำไปสูงได้คือ s p d และ f ตามลำดับในระดับพลังงานย่อย s p d และ f จะมีจำนวนอิเล็กตรอนที่จะบรรจุได้มากที่สุดไม่เกิน 2 6 10 และ 14 อิเล็กตรอน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในแต่ระดับพลังงานหลักยังคงยึดหลักจำนวนอิเล็กตรอนมีได้มากสุดไม่เกิน $2n^2$

ในการบรรจุอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยจะบรรจุอิเล็กตรอนเข้าระดับพลังงานย่อยที่มีพลังงานต่ำสุดก่อนจนเต็ม จึงจะบรรจุเข้าชั้นถัดไป เพื่อให้เป็นการง่ายในการบรรจุอิเล็กตรอนของอะตอมหนึ่งๆ ลงในออร์บิทัลเชิงอะตอมที่เหมาะสมได้แสดงลำดับการจัดเรียงอิเล็กตรอนตามลูกศรในภาพที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แผนภาพการจัดเรียงอิเล็กตรอน

ที่มา : CH150 CHAPTER 2 ATOMS AND PERIODIC TABLE, 2017

ตัวอย่าง การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานหลัก

คาร์บอน, C Z = 6 การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานหลัก เป็น 2 4

การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย เป็น $1s^2\ 2s^2\ 2p^2$

แคลเซียม, Ca Z = 20 การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานหลัก เป็น 2 8 8 2

การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย เป็น $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2$

ไอโอดีน, I Z = 53 การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานหลัก เป็น 2 8 18 18 7

การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย เป็น $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2$

$3d^{10}\ 4p^6\ 5s^2\ 4d^{10}\ 5p^5$

เพื่อให้การจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยมีความกระชับขึ้น อาจเขียนลำดับการจัดเรียงอิเล็กตรอนโดยอาศัยการจัดเรียงอิเล็กตรอนของแก๊สมีตระกูล (หมู่ VIIIA) เป็นสัญลักษณ์แก่น (core symbol) เนื่องจากในแต่ละออร์บิทัลเชิงอะตอมของระดับพลังงานหลักของแก๊สเฉื่อยมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบเต็ม (full-field) ดังตารางที่ 3.5 การเขียนการจัดเรียงอิเล็กตรอนโดยอาศัยสัญลักษณ์แก่นของแก๊สมีตระกูล ยังคงยึดหลักลำดับการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย ดังภาพที่ 3.21 แต่เพื่อให้การเขียนย่อลงจะใช้สัญลักษณ์แก่นของแก๊สมีตระกูลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยกว่าอะตอมที่ต้องการเขียนการจัดเรียงอิเล็กตรอน ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 การจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบเต็มของแก๊สเฉื่อย

สัญลักษณ์ธาตุ	การจัดเรียงอิเล็กตรอน	สัญลักษณ์แก่น
$_{2}He$	$1s^2$	[He]
$_{10}Ne$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6$	[Ne]
$_{18}Ar$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6$	[Ar]
$_{36}Kr$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^{10}\ 4p^6$	[Kr]
$_{54}Xe$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^{10}\ 4p^6\ 5s^2\ 4d^{10}\ 5p^6$	[Xe]

ที่มา : (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558)

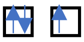
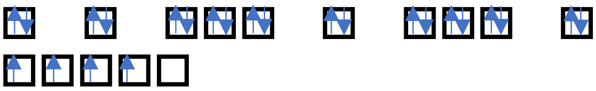
ตารางที่ 3.6 การเขียนโครงแบบอิเล็กตรอนโดยอาศัยสัญลักษณ์แก่นของแก๊สเฉื่อย

สัญลักษณ์ธาตุ	การจัดเรียงอิเล็กตรอน	โครงแบบอิเล็กตรอน
$_{6}C$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^2$	$[He]\ 2s^2\ 2p^2$
$_{16}S$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^4$	$[Ne]\ 3s^2\ 3p^4$
$_{27}Co$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^7$	$[Ar]\ 4s^2\ 3d^7$
$_{37}Rb$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^{10}\ 4p^6\ 5s^1$	$[Kr]\ 5s^1$
$_{58}Cd$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^{10}\ 4p^6\ 5s^2\ 4d^{10}\ 5p^6\ 6s^2\ 5d^2$	$[Xe]\ 6s^2\ 5d^2$

3) การจัดเรียงอิเล็กตรอนโดยเขียนเป็นแบบแผนออร์บิทัล

การเขียนโครงแบบอิเล็กตรอนแบบแสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย s p d และ f ไม่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนเกี่ยวกับพฤติกรรมของอิเล็กตรอนและความสอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของอะตอมนั้นๆ ได้ ดังนั้นการเขียนโครงแบบอิเล็กตรอนแบบแสดงการหมุนของอิเล็กตรอนที่บรรจุในออร์บิทัลเชิงอะตอมโดยอาศัยแผนภาพออร์บิทัลเชิงอะตอมจะสามารถบอกพฤติกรรมของอิเล็กตรอนและความสอดคล้องกับสมบัติทางแม่เหล็กของอะตอมนั้นๆ ดังแสดงในตัวอย่างตารางที่ 3.7 (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558)

ตารางที่ 3.7 ตัวอย่างการเขียนโครงแบบอิเล็กตรอนแบบแผนภาพออร์บิทัลเชิงอะตอม

สัญลักษณ์ธาตุ	การจัดเรียงอิเล็กตรอน	แผนภาพออร์บิทัลเชิงอะตอม
$_{1}H$	$1s^2$	
$_{3}Li$	$1s^2\ 2s^1$	
$_{7}N$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^3$	
$_{10}Ne$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6$	
$_{14}Si$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^2$	
$_{17}Cl$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^5$	
$_{24}Cr$	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^4$	
		1s 2s 2p 3s 3p 4s 3d

โครงแบบอิเล็กตรอนของอะตอมสามารถอธิบายสมบัติบางประการที่แตกต่างจากแนวโน้มปกติได้ เช่น อะตอม Be และ N จะแสดงสมบัติบางประการที่ไม่เป็นแนวโน้มเดียวกันกับธาตุอื่นๆ ในคาบเดียวกัน ซึ่งเหตุผลอธิบายด้วยเสถียรภาพของอะตอมที่มีผลมาจากการจัดเรียงอิเล็กตรอน ดังนี้

3.1) การบรรจุอิเล็กตรอนแบบเต็ม (full-filled) เป็นการบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานเท่ากันแบบเต็ม เช่น ออร์บิทัล-s บรรจุครบ 2 อิเล็กตรอน ออร์บิทัล-p บรรจุครบ 6 อิเล็กตรอน ออร์บิทัล-d บรรจุครบ 10 อิเล็กตรอน และออร์บิทัล-f บรรจุครบ 14 อิเล็กตรอน ตัวอย่างการบรรจุแบบเต็ม เช่น

$_{10}$Ne มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยเป็น $1s^2$ $2s^2$ $2p^6$ เขียนแบบแผนอิเล็กตรอนได้ ดังนี้

3.2) การบรรจุอิเล็กตรอนแบบครึ่ง (half-filled) เป็นการบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานเท่ากันเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนอิเล็กตรอนที่ครอบครองได้ทั้งหมดในออร์บิทัลนั้นๆ เช่น ออร์บิทัล-s บรรจุ 1 อิเล็กตรอน ออร์บิทัล-p บรรจุ 3 อิเล็กตรอน ออร์บิทัล-d บรรจุ 5 อิเล็กตรอน และออร์บิทัล-f บรรจุ 7 อิเล็กตรอน ตัวอย่างการบรรจุแบบครึ่ง เช่น

$_{7}$N มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยเป็น $1s^2$ $2s^2$ $2p^3$ เขียนแบบแผนอิเล็กตรอนได้ ดังนี้

โดยลำดับความเสถียรของอะตอมคือ การบรรจุแบบเต็ม > การบรรจุแบบครึ่ง > การบรรจุแบบไม่เต็ม/ไม่ครึ่ง

3.6 บทปฏิบัติการที่ 3 เรื่อง การตกผลึก

บทปฏิบัติการที่ 3
การตกผลึก

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจวิธีการทำสารให้บริสุทธิ์โดยการตกผลึก
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายขั้นตอนของการตกผลึกได้อย่างถูกต้อง

หลักการ

การตกผลึก (Crystalization) เป็นเทคนิคที่ทำให้สารที่เป็นของแข็งและมีสิ่งเจือปน (Firm purities) ให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น โดยการละลายสารที่จะทำให้บริสุทธิ์นั้นให้อิ่มตัว (Saturated solution) ณ จุดเดือดของตัวทำละลาย (solvent) จากนั้นกรองสารละลายขณะร้อนเพื่อกำจัด สิ่งเจือปนที่ไม่ละลายออก ถ้าสารละลายมีสีเจือปนให้กำจัดโดยเติมผงคาร์บอนฟอกจางสี (Decolorizing charcoat) แล้วกรองขณะ

ร้อน ปล่อยให้สารละลายที่กรองได้ (filtrate) ค่อยๆ เย็นลง เพื่อให้ของแข็งตกผลึก กรองแยกผลึกออกจากสารละลายหลังตกผลึก (mother liquor) ล้างผลึก และทำให้แห้ง

คุณสมบัติของตัวทำละลายที่ใช้ในการตกผลึก ตัวทำละลายไม่ควรทำปฏิกิริยากับสารที่ ต้องการทำให้บริสุทธิ์ และควรมีจุดเดือดต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสาร สามารถละลายสารที่ต้องการ ทำให้บริสุทธิ์ได้มากขณะร้อนแต่ละลายได้น้อยมากในขณะเย็น ไม่ควรจะละลายสิ่งเจือปนเมื่อร้อน หรือควรละลายสิ่งเจือปนได้ดีเมื่อเย็น ตัวทำละลายควรมีจุดเดือดปานกลางเพื่อกำจัดออกไปง่าย ขณะที่ทำให้ผลึกแห้งต้องไม่เป็นพิษ ไม่ไวไฟ และราคาถูก ตัวทำละลายที่นิยมใช้กันมากเช่น น้ำ เมทานอล เอทานอล อะซิโตน เอทิลแอซิเตต คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน ไดเอทิลอีเทอร์ เฮกเซน ปิโตรเลียมอีเทอร์

การเลือกตัวทำละลายให้เหมาะสมในการตกผลึก มีหลักการ คือถ้าเป็นสารที่มีการศึกษาไว้ แล้วให้ค้นหาจากคู่มือต่างๆ แต่ถ้าเป็นสารใหม่ต้องใช้วิธีทดสอบการละลายด้วยตนเอง (trial and error) โดยใช้หลักที่ว่า สารประเภทเดียวกันหรือคล้ายกันจะละลายกันได้ (like dissolves Like) เช่น สารที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar compound) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar solvent) แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว (Polar solvent) เช่น แนฟทาลีนละลายในตัวทำละลายเพนเทน และเฮกเซนได้ดีมาก แต่ไม่ละลายในน้ำ เป็นต้น สำหรับความมีขั้วหรือไม่มีขั้วของตัวทำละลายอาจ ทำนายได้จากค่า dielectric constant ดังตารางที่ 2.6 ตัวทำละลายที่มีค่า dielectric Constant ระหว่าง 2-3 จัดเป็นประเภทไม่มีขั้ว พวกที่มีค่าระหว่าง 3-10 จัดเป็นประเภทมีขั้วปานกลาง และ พวกที่มีค่ามากกว่า 10 ขึ้นไปจัดเป็นประเภทมีขั้ว เป็นต้น

ในกรณีที่หาตัวทำละลายเดี่ยวที่เหมาะสมเพื่อใช้ตกผลึกสารบางชนิดไม่ได้ อาจใช้ตัวทำ ละลายผสมได้ ซึ่งตัวทำละลายนั้นจะต้องละลายเป็นเนื้อเดียวกัน สารที่ต้องการทำให้บริสุทธิ์ต้อง ละลายได้ดีในตัวทำละลายชนิดหนึ่งและไม่ละลายหรือละลายได้น้อยในตัวทำละลายอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมี วิธีทำดังนี้ ต้มของแข็งในตัวทำละลายซึ่งสารนั้นละลายได้ดีก่อนโดยใช้ตัวทำละลายเพียงเล็กน้อย (กรองสิ่งเจือปนออกขณะร้อนถ้ามี) แล้วจึงเติมตัวทำละลายที่ของแข็งนั้นไม่ละลายลงไปช้าๆ จนกระทั่งสารละลายเริ่มอุ่น แล้วจึงเติมตัวทำละลายชนิดแรกลงไปที่ละหยด จนสารละลายใสพอดีอีกครั้ง เมื่อทิ้งสารละลายให้เย็นควรจะได้ผลึก ถ้ายังไม่ได้ผลึกควรอุ่นสารละลายนั้นอีก แล้วเติมตัวทำ ละลายชนิดหลังลงไปเล็กน้อย จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นลงอย่างช้าๆ ตัวอย่างของตัวทำละลายผสมแสดงไว้ ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ตัวทำละลายที่ใช้ในการตกผลึกเรียงลำดับจากสารที่ความเป็นขั้วต่ำไปสูง

ตัวทำละลาย	สูตรโครงสร้าง	จุดเดือด (°C)	การละลายน้ำ	การติดไฟ	Dielectric constant
Petroleum ether	C_nH_{2n+2} (n=5,6)	35-60	ไม่ละลาย	ติดไฟ	1.9
Diethyl ether	$(CH_3CH_2)_2O$	35	ละลายเล็กน้อย	ติดไฟ	4.34
Chloroform	$CHCl_3$	61	ไม่ละลาย	ไม่ติดไฟ	4.81
Ethyl acetate	$CH_3COOCH_2CH_3$	77	ไม่ละลาย	ไม่ติดไฟ	6.02
Dichloromethane	CH_2Cl_2	41	ไม่ละลาย	ไม่ติดไฟ	9.08
Acetone	CH_3COCH_3	56	ละลาย	ติดไฟ	20.7
95% ethanol	CH_3CH_2OH	78	ละลาย	ติดไฟ	24.6
Methanol	CH_3OH	65	ละลาย	ติดไฟ	32.63
Water	H_2O	100	ละลาย	ไม่ติดไฟ	78.54

ตารางที่ 2.7 ตัวทำละลายที่ใช้เป็นคู่ในการตกผลึก

ethyl acetate-hexane	ethanol-dichloromethane
ethyl acetate-petroleum ether	methanol-dichloromethane
ethyl acetate-benzene	ethanol-chloroform
diethyl ether- petroleum ether	methanol-chloroform
acetone-diethyl ether	water-acetone
methanol-diethyl ether	water-methanol

ขั้นตอนในการตกผลึกด้วยตัวทำละลายชนิดเดียว

ขั้นที่ 1 การเตรียมสารละลาย เมื่อเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมได้แล้ว ให้เตรียมสารละลายที่อิ่มตัวที่จุดเดือดของตัวทำละลายนั้น โดยใส่ของแข็งในขวดรูปชมพู่ จากนั้นเติมตัวทำละลายลงไปแล้วนำขวดรูปชมพู่ไปต้มบนอ่างอังไอน้ำ (steam bath) หรือ บนแผ่นความร้อน (hot plate) ถ้าของแข็งยังละลายไม่หมดให้เติมตัวทำละลายลงไปอีกแล้วต้มต่อไป แต่ไม่ควรใช้ตัวทำละลายมากเกินไปจะทำให้สารตกผลึกออกมาน้อย ในขณะต้มสารละลายควรใส่ boiling chips หรือเศษกระเบื้องแตก 2-3 ชิ้น เพื่อให้แก๊สที่ออกมาจาก boiling chips ทำให้ของเหลวกระจายตลอดเวลาและกันไม่ให้เกิด Superheating ถ้าใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นอันตราย เช่น เบนซีน จะต้องทำในตู้ดูดควัน

ขั้นที่ 2 การกรองสารละลายขณะร้อน มีจุดมุ่งหมายที่จะกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ละลายในตัวทำละลายขณะร้อนออก การกรองสารละลายที่มีปริมาณไม่มาก (ไม่เกิน 600 มิลลิลิตร) นิยมกรองด้วยกรวยแก้วก้านสั้น และพับกระดาษกรองทบไปทบมา (tote filter paper) หรือแบบลูกฟูกนั่นเอง เพื่อให้กรองได้เร็วจะได้ไม่มีผลึกค้างอยู่บนกระดาษกรองหรือกรวยกรอง การกรองสารละลายขณะร้อนเพื่อป้องกันการ

ตกผลึก ก่อนกรองจึงต้องให้ความร้อนทั้งกรวยกรองและภาชนะรองรับ เมื่ออุปกรณ์ทุกชิ้นร้อนแล้วให้กรองสารละลายขณะร้อนทันที ไม่ต้องกรองด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum filtration) เพราะการใช้ระบบสุญญากาศทำให้สารละลายที่ร้อนระเหยเร็วขึ้น จะทำให้ของแข็งตกผลึกบนกระดาษกรองและอุดตามรูกรวยกรอง

สารที่มีสีอาจกำจัดได้โดยเติมผงคาร์บอนฟอกจางสี (Decolorizing charcoal) จำนวนเล็กน้อยลงในสารละลายที่ร้อน (ไม่ใช่ในขณะที่เดือด) แล้วต้มให้เดือดอีก 35 นาที เพื่อให้ฟอกสีได้ดีขึ้น เขย่าขวดแล้วกรองขณะร้อนโดยใช้กรวยแก้วก้านสั้น

ขั้นที่ 3 การทำสารละลายให้เย็น เพื่อให้ของแข็งที่ต้องการทำให้บริสุทธิ์ตกผลึกออกมาให้ได้มากที่สุดแต่ให้สิ่งเจือปนยังคงละลายอยู่ใน mother liquor โดยปกติมักจะปล่อยให้สารละลายที่กรองได้อิ่มตัวขณะร้อนแล้วค่อยๆ เย็นลงถึงอุณหภูมิห้องโดยไม่ถูกรบกวนเลย สารจะตกผลึกเป็นรุ่นแรก (first crop) การที่จะตรวจดูว่าผลึกที่ได้บริสุทธิ์หรือไม่ สามารถตรวจโดยการหาจุดหลอมเหลวของผลึก เพราะผลึกที่ตกรุ่นแรกมักจะบริสุทธิ์ ถ้าปรากฏว่าผลึกไม่บริสุทธิ์ก็ต้องตกผลึกซ้ำ (recrystallization)

ในบางครั้งพบว่าแม้จะใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม และสารละลายที่อิ่มตัวก็ยังไม่ตกผลึกแม้จะทิ้งไว้นานในกรณีเช่นนี้อาจใช้แท่งแก้วขุดภายในขวดเหนือผิวของเหลวเพื่อไปเหนี่ยวนำให้เกิดการตกผลึก หรือให้ใส่ผลึกเล็กๆ ที่บริสุทธิ์ของสารนั้นไป 1 เกล็ด ผลึกก็จะตกเร็วขึ้น เรียกวิธีนี้ว่า “seeding”

ขั้นที่ 4 การกรองผลึก เมื่อผลึกตกอย่างสมบูรณ์แล้วให้กรองเพื่อแยกผลึกออกจากสารละลายโดยใช้กรวยบุชเนอร์ที่เสียบไว้กับขวดกรองด้วยจุกยาง วางกระดาษกรองที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวยบุชเนอร์เล็กน้อย ก่อนจะกรองต้องทำให้กระดาษกรองเปียกเล็กน้อยด้วยตัวทำละลายที่ใช้ในการตกผลึกนั้น กดกระดาษกรองให้แนบกรวยกรองให้สนิท จับคอขวดกรองให้แน่นด้วย clamp แล้วต่อสายยางดูดอากาศกับขวดกรองรอให้กระดาษกรองแนบกับกรวยสนิทแล้วเทสารละลายลงในกรวย เอาแท่งแก้วหรือช้อนตักสารที่ทำด้วยโลหะกวาดผลึกจากขวดลงในกรวย ผลึกที่เหลืออาจใช้ตัวทำละลายที่เย็นจัดจำนวนเล็กน้อยช่วยชะล้างผลึกออกมา

ขั้นที่ 5 การล้างผลึก ขั้นตอนนี้เป็นการล้างผลึกเพื่อขจัด mother liquor ที่ติดอยู่ที่ผิวผลึกออกให้หมดโดยเทตัวทำละลายที่เย็นจำนวนเล็กน้อยลงบนผลึก (ตัวทำละลายที่ใช้ล้างต้องเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ผลึก)เพื่อล้างสารละลายออกจากผลึก โดยยังคงดูดด้วยระบบสุญญากาศ การล้างผลึก ควรใช้ตัวทำละลายเพียงเล็กน้อยและเย็นจัด

ขั้นที่ 6 การทำผลึกให้แห้ง เพื่อขจัดตัวทำละลายที่เหลือให้หมด โดยใช้ช้อนโลหะตักผลึกบนกระดาษกรองของกรวยบุชเนอร์ถ่ายลงในกระจกนาฬิการที่แห้งและสะอาด แล้วปล่อยให้แห้งโดยใช้ บีกเกอร์ครอบกระจกนาฬิกาเพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นละอองตกลงไปหรืออาจใส่ใน desiccator ก็ได้

การทำให้สารบริสุทธิ์โดยการตกผลึกนั้นจะต้องระลึกไว้เสมอว่าสิ่งเจือปนจะละลายอยู่ใน mothor liquor ดังนั้นในการทดลองจะต้องให้มีตัวทำละลายเพียงพอที่ทำให้สิ่งเจือปนยังคงอยู่ในสารละลาย ซึ่งในขณะเดียวกันสารที่จะทำให้บริสุทธิ์ก็จะต้องละลายในตัวทำละลายได้บ้างในขณะเย็น เหตุ

นี้อาจส่งผลให้สารนั้นสูญหายไปบ้าง ทั้งนี้ย่อมขึ้นอยู่กับความชำนาญในการตกผลึกของผู้ทำการ สรุปขั้นตอนของการตกผลึก ทดลองเอง

สรุปขั้นตอนของการตกผลึก

นำสารละลายตัวอย่างมาหาตัวทำละลายที่เหมาะสมในการตกผลึก

↓

ทำให้สารละลายอิ่มตัว ณ จุดเดือดของตัวนำ

↓

กรองสารละลายขณะร้อน

↓

วางสารละลายที่อิ่มตัวให้เย็น

↓

กรองผลึก

↓

ทำให้ผลึกแห้ง

↓

หาจุดหลอมเหลวเพื่อตรวจสอบความบริสุทธิ์

การทดลอง

<u>อุปกรณ์</u>

1. หลอดทดลองพร้อมที่วางหลอด
2. บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
3. แผ่นให้ความร้อน (hot plate)
4. ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร
5. กรวยกรอง
6. กรวยบุชเนอร์
7. ขวดกรอง
8. กระดาษกรอง

<u>สารเคมี</u>

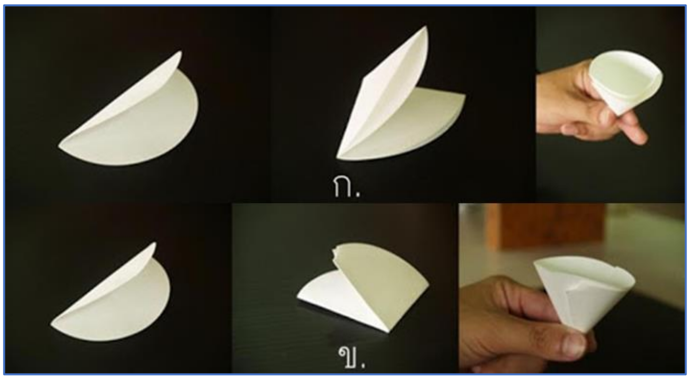
1. สารตัวอย่างบริสุทธิ์
2. ตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำกลั่น ethanol acetone hexane
3. Acetanilide ที่มีสิ่งเจือปน

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การพับกระดาษกรอง

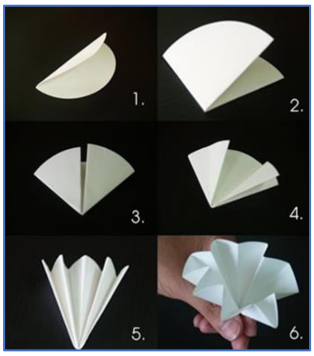
การพับกระดาษกรองอาจทำได้ 2 วิธี

1.1 การพับแบบกรวย (รูปที่ 2.17) ใช้ในการกรองที่ต้องการเก็บตะกอนให้หมดทำได้โดยการพับครึ่งและพับหนึ่งในสี่ การพับหนึ่งในสี่นี้ขอบของกระดาษกรองอาจพับกันสนิท หรือเหลื่อมล้ำกันเล็กน้อย (3 มิลลิเมตร) ก็ได้ การฉีกมุมหนึ่งของกระดาษกรองประมาณหนึ่งในสามของรัศมีของกระดาษกรอง จะช่วยให้กระดาษกรองแนบกับกรวยแก้วได้ดีขณะทำการกรอง



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนการพับกระดาษกรองแบบกรวย

1.2 การพับแบบลูกฟูก (รูปที่ 2.18) การพับแบบนี้ใช้กับการทดลองที่ต้องการความรวดเร็ว เพราะพื้นที่ผิวของกระดาษกรองที่สารละลายไหลผ่านมีมากกว่าแบบแรก การพับทำได้โดยการพับครึ่งแล้วพับหยักไปมาคล้ายใบพัด



รูปที่ 2.18 ขั้นตอนการพับกระดาษกรองแบบลูกฟูก

ตอนที่ 2 การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดในการตกผลึก นักศึกษาจะได้รับแจกสารตัวอย่างบริสุทธิ์ กลุ่มละ 1 ตัวอย่าง ให้จดหมายเลขของสารตัวอย่าง ไว้ในรายงานการทดลอง แล้วทำการทดลองหาตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยใส่สารตัวอย่างลงในหลอด ทดลองขนาดเล็ก 4 หลอดๆ ละประมาณ 50 มิลลิกรัม หลอดที่หนึ่งเติมน้ำที่ละหยดจนครบ 10 หยด เขย่า ในขณะที่เติมโดยวิธีเดียวกัน หลอดที่ 2 3 และ 4 ให้ใช้เอทานอล อะซิโตน และเฮกเซน เป็นตัวทำละลาย ตามลำดับ ให้สังเกตและเปรียบเทียบดูว่าสารแต่ละหลอดจะละลายหมดหรือไม่ละลายในตัวทำละลายใด

นำหลอดที่สารไม่ละลายไปอุ่นบนอ่างน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวทำละลาย สังเกตดูว่าหลอดไหนละลายได้หมด หลอดไหนไม่ละลาย (หลอดที่มีน้ำมันลอยอยู่แสดงว่าไม่ละลาย) สำหรับหลอดที่ไม่ละลายให้เติมตัวทำละลายลงไปอีกประมาณ 10 หยด สังเกตและบันทึกผล นำสารละลายที่ร้อนตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงอย่างช้าๆ ให้สังเกตว่าหลอดไหนตกผลึกได้เร็ว มีปริมาณมาก และมีลักษณะผลึกดีที่สุด ถ้าหาตัวทำละลายเดียวที่เหมาะสมไม่ได้ ให้ทดลองหาตัวทำละลายผสมโดยสารนั้นต้องละลายได้ดีในตัวทำละลายชนิดหนึ่งแต่ไม่ละลายในอีกชนิดหนึ่ง

ตอนที่ 3 การตกผลึก acetanitide นักศึกษาจะได้รับแจก acetanitide ที่ไม่บริสุทธิ์ กลุ่มละ 1 ห่อ หนักประมาณ 1 กรัม ให้ตกผลึกด้วยน้ำ ให้หาจุดหลอมเหลวของ acetanitide ก่อนการตกผลึกและหลังการตกผลึกแล้วละลาย acetanitide ที่ไม่บริสุทธิ์ 1 กรัม ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำในปริมาณ พอเพียงที่จะละลาย acetanitide ให้หมดในขณะที่ร้อน ต้มให้เดือด เติมน้ำอีก 3 มิลลิลิตร ในขณะที่ยังเดือด แล้วกรองสารละลายในขณะที่ร้อนผ่านกระดาษกรองบนกรวยแก้วก้านสั้นซึ่งทำให้ร้อนอยู่ก่อนแล้ว (อาจทำโดยการผ่านตัวทำละลายที่ร้อนบนกระดาษกรองและกรวยก่อนหน้าที่จะกรอง หรือต้มตัวทำละลายในขวดรูปชมพู่ที่จะใช้รองรับพร้อมกับกรวยก้านสั้นและกระดาษกรองจนร้อน) เทตัวทำละลายออกจากขวดรองรับแล้วจึงกรองลงในขวดรูปชมพู่ที่ร้อนขนาด 50 มิลลิลิตร วางสารละลายให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จะมีผลึกเกิดขึ้น แล้วนำไปแช่ในอ่างน้ำเย็นประมาณ 20 นาที เพื่อให้ผลึกตกสมบูรณ์ เมื่อสารละลายเย็นแล้วกรองผลึกด้วยขวดกรองดังวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว ล้างผลึกบนกระดาษกรองด้วยน้ำเย็น 2 ครั้งๆ ละ 5 มิลลิลิตร ใช้ช้อนตักสารกดบนผลึกเพื่อให้แห้งมากขึ้น แล้วนำผลึกที่ค่อนข้างแห้งนี้ไปเกลี่ยบนกระจกนาฬิกา พึ่งให้แห้ง นำไปชั่ง แล้วหาจุดหลอมเหลว ส่งผลึกพร้อมกับรายงานผลการทดลอง

รายงานการทดลองที่ 3

การตกผลึก

หมู่ที่............วิชาเอก..คณะ..

ทำการทดลองวัน.................ที่.........เดือน.......................พ.ศ. ....เวลา....................

ชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมการทดลอง..

ผู้ทำการทดลอง...รหัสนักศึกษา...................

ผู้ร่วมทำการทดลอง..รหัสนักศึกษา...................

ผู้ร่วมทำการทดลอง..รหัสนักศึกษา...................

ผลการทดลอง

ตอนที่ 2 การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดในการตกผลึก

หมายเลขของสารตัวอย่าง...

ตัวทำละลาย	**ผลที่สังเกตเห็น**		
	ขณะเย็น	**ขณะร้อน**	**เมื่อตั้งทิ้งไว้**
น้ำ	....	....	....
Ethanol	....	....	....
Acetone	....	....	....
Hexane	....	....	....
....	....	....	....
....	....	....	....

ตัวทำละลายที่เหมาะสมในการตกผลึก คือ ....

เพราะ ....

....

ตอนที่ 3 การตกผลึก acetanilide

acetanilide ที่ไม่บริสุทธิ์มีลักษณะ..

acetanilide ภายหลังตกผลึกด้วยน้ำเป็นรูป .... สี ....

จุดหลอมเหลวของ acetanilide ก่อนตกผลึก ....

จุดหลอมเหลวของ acetanilide หลังตกผลึก ....

น้ำหนักของ acetanilide ก่อนตกผลึก ....

น้ำหนักของ acetanilide หลังตกผลึก --

ร้อยละของผลึกที่ได้ ------------------------------------

วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

ข้อเสนอแนะ

3.7 สรุป

อะตอมประกอบด้วยอนุภาคพื้นฐานทั้ง 3 ชนิด คือ อิเล็กตรอน โปรตอน นิวตรอน ซึ่งสามารถสรุปได้จากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์หลาย ดังนั้นโครงสร้างอะตอมตั้งแต่สมัยเริ่มแรกจนถึงปัจจุบันจึงมีการเปลี่ยนแปลงเรื่อยมา เริ่มจากโครงสร้างอะตอมของดอลตันที่เป็นทรงกลมตัน ไม่ทราบส่วนประกอบภายในจนมาเป็นโครงสร้างอะตอมของทอมสันที่มีประจุบวกและลบกระจายภายใน ต่อมาเปลี่ยนมาเป็นแบบโครงสร้างที่มีนิวเคลียสและมีประจุบวกอยู่ภายในมีอิเล็กตรอนวิ่งรอบนอกตามแบบจำลองของรัทเทอร์ฟอร์ดจนมาถึงนีลส์โบร์ที่ได้อธิบายว่าโครงสร้างอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียส มีอิเล็กตรอนวิ่งรอบนอกคล้ายระบบสุริยะโดยใช้ทฤษฎีควอนตัม จนในปัจจุบันได้มีการยอมรับทฤษฎีของกลศาสตร์เชิงคลื่นของชเรอดิงเงอร์หรือโครงแบบอิเล็กตรอนแบบกลุ่มหมอก เนื่องจากสามารถอธิบายสมบัติต่างๆ ได้สอดคล้องมากที่สุด

การจัดเรียงอิเล็กตรอนของธาตุ สามารถเขียนการจัดเรียงได้หลายแบบ ทั้งการจัดเรียงในระดับพลังงานหลัก การจัดเรียงในระดับพลังงานย่อย และการเขียนแบบแผนอิเล็กตรอน ซึ่งในการจัดเรียงอิเล็กตรอนต้องมีพื้นฐานความรู้ในเรื่องของออร์บิทัล คือรูปร่างของออร์บิทัล พลังงานของออร์บิทัล เพื่อใช้ในการพิจารณาการจัดเรียงอิเล็กตรอนของธาตุในตารางธาตุ นอกจากนั้นยังต้องมีความรู้เรื่องเลขควอนตัม 4 ชนิดควบคู่กันไปอีกด้วย

3.8 แบบฝึกหัดท้ายบท

1. จงอธิบายวิวัฒนาการแบบจำลองอะตอมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน
2. จงอธิบายแบบจำลองของรัทเทอร์ฟอร์ด
3. จงอธิบายแนวคิดโครงสร้างทฤษฎีอะตอมของดอลตัน
4. จงอธิบายแบบจำลองอะตอมของนีลส์โบร์
5. จงเขียนโครงแบบอิเล็กตรอนของอะตอมต่อไปนี้แบบพลังงานหลัก พลังงานย่อยและโครงแบบอิเล็กตรอน

   ก. ${}_{16}S$ ข. ${}_{13}Al$

   ค. ${}_{24}Cr$ ง. ${}_{27}Co$

   จ. ${}_{29}Cu$ ฉ. ${}_{17}Cl$

6. จงเขียนแผนภาพออร์บิทัลเชิงอะตอมของธาตุต่อไปนี้

   ก. ${}_{5}B$ ข. ${}_{9}F$

   ค. ${}_{8}O$ ง. ${}_{4}Be$

   จ. ${}_{7}N$ ฉ. ${}_{6}C$

7. จงแสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยของไอออนต่อไปนี้

   Ca^{2+} Fe^{3+} Cr^{3+} S^{2-} P^{3-}

8. จงอธิบายความหมายของการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบเต็มและแบบครึ่ง
9. จงสรุปอนุภาคมูลฐานของอะตอม
10. จงเติมข้อมูลในตารางที่ว่างอยู่ให้ถูกต้อง

ธาตุ	เลขอะตอม	จำนวนอนุภาคมูลฐานในอะตอม			เลขมวล	สัญลักษณ์นิวเคลียร์
		โปรตอน	นิวตรอน	อิเล็กตรอน		
Na	11	....	....	....	23	....
Mg	....	12	....	....	24	....
Ca	....	....	20	20	....	....
O	....	8	8	....	....	....
Co	....	....	....	....	....	${}^{60}_{27}Co$

ธาตุ	เลขอะตอม	จำนวนอนุภาคมูลฐานในอะตอม			เลขมวล	สัญลักษณ์นิวเคลียร์
		โปรตอน	นิวตรอน	อิเล็กตรอน		
P	15	....	16	....	....	....

3.9 เอกสารอ้างอิง

กฤษณา ชุติมา. (2556). หลักเคมีทั่วไป 1. (พิมพ์ครั้งที่ 19). กรุงเทพมหานคร : สนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2565). **จอห์น ดอลตัน บิดาแห่งทฤษฎีอะตอมสมัยใหม่.** สืบค้นเมื่อ 18 สิงหาคม 2565, จาก https://www.ipst.ac.th/knowledge/32433/johndalton.html.

ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์. (2566). **ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์.** สืบค้นเมื่อ 18 สิงหาคม 2565, จาก http://www3.rdi.ku.ac.th/cl/webpages/microscope.htm

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์. (2555). **Compact เคมี ม.4 เล่ม 1.** กรุงเทพฯ : แม็ค.

อนุสิษฐ์ เกื้อกูล. (2560). **แบบจำลองอะตอม (Atomic Model).** สืบค้นเมื่อ 18 สิงหาคม 2565, จาก http://scimath.org/lesson-chemistry/item/7121-atomic-model

เกตุกัญญา สายสาหร่าย. (2566). แบบจำลองอะตอมของทอมสัน. สืบค้นเมื่อ 18 สิงหาคม 2565, จาก http://thn24931-chem4.blogspot.com/p/blog-page.html

Moore, J.W. , Stanitski, C.L & Jurs, P.C. (2002). **CHEMISTRY-The Molecular Science**. Fort Worth: Harcourt college.

Raymond Chang.(2017). **เคมี1 chemistry 12/e**. แมคกรอ-ฮิล อินเตอร์เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์ แอล
แอลซี: กรุงเพมหานคร.

วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. (2558). **เคมีสำหรับวิศวกร**. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

Silberberg M. S. (2013). Principle of General Chemistry. New York: McGraw-Hill.

Petrucci, R. H., Harwood, W. S. & Herring, F. G. (2002). **General chemistry-principlesand modern applications (8th ed.)**. N.J.: Prentice Hall.

Richard Parsons. (2009). **CK-12 Foundation: Quantum Mechanics Model of the Atom**. from websit http:cafreetextbooks.ck12.org/science/CK12_Chemistry.pdf.

โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สตรีวิทยา พุทธมณฑล. (2555). **รูปร่างของออร์บิทัล (Shape of orbital)**. สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2565, จาก
http://www.satriwit3.ac.th/external_newsblog.php?links=1251

Petrucci, R. H., Harwood, W. S. & Herring, F. G. (2002). General chemistry-principlesand modern applications (8th ed.). N.J.: Prentice Hall.

โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สตรีวิทยา พุทธมณฑล. (2555). **โครงสร้างอะตอม ตอนที่ 5 แบบจำลองอะตอมของโบห์ร**. สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2565. จาก http://www.satriwit3.ac.th/external_newsblog.php?links=1243