

## บทที่ 2

### น้ำชนิดหนัก

#### 2.1 น้ำชนิดหนักคืออะไร

ถ้าหากมองดูคุณสมบัติทั่ว ๆ ไปไม่ว่าจะเป็นสถานะ สี กลิ่น รส และการละลายแล้ว น้ำชนิดหนัก (Heavy Water) ก็ไม่แตกต่างอะไรไปจากน้ำธรรมดาที่พบในธรรมชาติกันอยู่ แต่ทว่า น้ำชนิดหนักเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และผลิตขึ้นเพื่อบรรจุเข้าไว้ในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ให้ทำหน้าที่เป็นตัวหน่วง (moderator) นิวตรอนที่พุ่งออกจากปฏิกิริยาแตกตัวของนิวเคลียร์ (nuclear fission reaction) ซึ่งจะช่วยให้นิวเคลียสของเชื้อเพลิงยูเรเนียมสามารถจับนิวตรอนไว้ได้ และก่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่อย่างต่อเนื่องไป คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ที่สามารถหน่วงนิวตรอนได้ดีและไม่ดูดจับนิวตรอนไว้เอง เป็นบทบาทสำคัญที่ทำให้มีการผลิตน้ำชนิดหนักสำหรับใช้ในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ อีกทั้งน้ำชนิดหนักยังทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อน (coolant) ได้ดีอีกด้วย

#### ตารางที่ 2.1

คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของน้ำชนิดหนัก เปรียบเทียบกับสารชนิดอื่น (22)

สาร	Moderation Ratio	Thermal Absorption Crosssection (barn)
น้ำธรรมดา	72	-
ไฮโดรเจน	-	0.332
น้ำชนิดหนัก	12000	-
ดีวเทอเรียม	-	0.0005
เบอริลเลียม	125	0.01
กราไฟต์	205	0.0038
ซีเลียม	45	0.0
ยูเรเนียม	0.009	7.68
ออกซิเจน	-	0.0002

ในธรรมชาติธาตุไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป คือ protium ( ${}^1_1\text{H}$ ), deuterium ( ${}^2_1\text{H}$ ) และ tritium ( ${}^3_1\text{H}$ ) protium เป็นไอโซโทปที่พบทั่วไป นิวเคลียสประกอบด้วย 1 โปรตอนเมื่อรวมตัวกับออกซิเจน จะเกิดเป็นสารประกอบ คือ น้ำธรรมดา ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ส่วนนิวเคลียสของ deuterium ประกอบด้วย 1 โปรตอน และ 1 นิวตรอน จึงหนักเป็น 2 เท่าของ protium โดยประมาณ เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนจึงเกิดเป็นน้ำหนักหนัก (Heavy Water) มีชื่อทางเคมีว่า  $\text{D}_2\text{O}$  หรือ deuterium oxide ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติในปริมาณที่น้อยเหลือเกิน ส่วนนิวเคลียสของ tritium ประกอบด้วย 1 โปรตอน และ 2 นิวตรอน เป็นไอโซโทปที่หนักยิ่งยวด (super heavy) และยังเป็นสารกัมมันตรังสี (radioactive) อีกด้วย พบในบรรยากาศในปริมาณน้อยเนื่องจากธาตุไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป และธาตุออกซิเจนก็มี 3 ไอโซโทป จึงเป็นไปได้ที่จะสามารถรวมตัวเป็นน้ำหนักต่าง ๆ กันได้ถึง 18 ชนิดทีเดียว

Harold C. Urey และคณะเป็นผู้ค้นพบ deuterium ในปี ค.ศ. 1932 โดยการระเหยไฮโดรเจนเหลว แล้วตรวจสอบโดยวิธี optical spectrography พบว่า ส่วน residue คือ deuterium การค้นพบนี้ทำให้ Urey ได้รับรางวัลโนเบลในปีค.ศ. 1934 แม้ว่าผู้ที่ทำนายไว้ว่ามีไอโซโทปดังกล่าวคือ Rutherford จะเสนอไว้ตั้งแต่ ค.ศ. 1920 แล้วก็ตาม

## 2.2 บทบาทและความสำคัญของน้ำหนักหนัก

นับตั้งแต่มีการค้นพบนิวเคลียสของ deuterium เป็นต้นมา การวิจัยในเชิงประยุกต์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ก็มีมากขึ้นโดยลำดับ ซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้

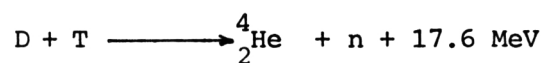
### 2.2.1 ในปฏิกิริยาแตกตัวทางนิวเคลียร์ (Nuclear Fission Reaction)

เนื่องจากคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของน้ำหนักหนักมีค่า moderating ratio สูง และค่า capture cross section ค่า สำหรับ thermal neutron จึงใช้เป็น moderator ในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้เป็นอย่างดี เพราะสามารถใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติ ซึ่งมียูเรเนียม-235 เพียง 0.711% ได้ และทำให้ขนาดของปฏิกรณ์เล็กลงอีกด้วย นอกจากนี้

ในปฏิกรณ์บางชนิด ยังใช้น้ำชนิดหนักเป็นตัวทำละลาย (solvent) แก๊สของยูเรเนียมและพลูโทเนียมอีกด้วย

### 2.2.2 ในปฏิกิริยาหลอมตัวทางนิวเคลียร์ (Nuclear Fusion Reaction)

นอกจากดีวเทอเรียม จะเป็นสารสำคัญในตัวปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้ Heavy Water เป็น moderator แล้ว ดีวเทอเรียมเอง ยังเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในปฏิกิริยาแบบหลอมตัว (Fusion reaction) กล่าวคือ ในภาวะพลาสมา (Plasma state) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 100 ล้านองศาเซลเซียส ดีวเทอเรียมและ ทริเทียมซึ่งอยู่ในสภาพเป็นประจุ จะมีพลังงานสูงเกินกว่าแรงผลักระหว่างนิวเคลียส ทำให้หลอมตัวรวมกันเข้า เป็นผลให้อยู่ในภาวะเร้าตัวอย่างยิ่ง (highly excited state) จึงปลดปล่อยพลังงานออกมา ถึงประมาณ 17.6 MeV พร้อมกับนิวตรอน 1 อนุภาค ในชั่วเวลา 1 ในร้อยล้านล้านวินาที ส่วนอนุภาคที่เหลืออยู่จะรวมตัวเกิดเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม พลังงาน 80% ที่แผ่มา กับนิวตรอนจะถูกจับและถ่ายเทไว้ที่กำบังลิเทียม (lithium blanket) แล้วถ่ายเทไปแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ยังอยู่ในระหว่างการวิจัยประยุกต์



ปฏิกิริยาหลอมตัวทางนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นโดยใช้ดีวเทอเรียมและ ทริเทียม เป็นเชื้อเพลิง

พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยานี้ คิดเทียบแล้วประมาณ 247 พันล้าน BTU/lb ปริมาณดีวเทอเรียมที่มีอยู่ในโลกประมาณ  $10^{17}$  ปอนด์ รวมแล้วจะให้พลังงานได้ทั้งหมดถึง  $2.5 \times 10^{28}$  BTU ซึ่งถ้าหากเทียบกับอัตราการบริโภคพลังงานในปัจจุบันจะใช้ไปได้จนถึง  $10^{11}$  ปี

### 2.2.3 ในด้านการศึกษาริชัยทางวิทยาศาสตร์

เนื่องจาก Heavy Water มีคุณสมบัติทั้งที่เหมือนและต่างไปจากน้ำธรรมดา

จึงสามารถประยุกต์ไปใช้ศึกษาคุณสมบัติของสารหรือปฏิกิริยาบางอย่างได้ เช่น การศึกษาคุณสมบัติทางชีวภาพของ DNA และกระบวนการ เมตาบอลิซึมของสารชีวเคมีในเซลล์ โดยใช้เป็น tracer หรือใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการทำ hydrolysis สารอินทรีย์บางชนิด รวมทั้ง การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของสารประกอบ hydride ที่ต่างไอโซโทปอีกด้วย

### 2.3 คุณสมบัติของน้ำชนิดหนัก

แม้ว่าคุณสมบัติโดยทั่วไปของน้ำชนิดหนักจะเกือบเหมือนกับน้ำธรรมดา แต่เนื่องจากความแตกต่างของไอโซโทปของไฮโดรเจนในองค์ประกอบ ทำให้เกิดความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพดังประมวลไว้ในตารางที่ 2.2

#### ตารางที่ 2.2

เปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำธรรมดากับน้ำชนิดหนัก ( 5 )

คุณสมบัติ	น้ำ (H <sub>2</sub> O)	น้ำชนิดหนัก (D <sub>2</sub> O)	หน่วย
น้ำหนักโมเลกุล	18.016	20.029	-
ค่าดัชนีหักเห	1.333	1.328	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.00	1.107	-
ความหนาแน่นที่ 25°C	0.99707	1.1066	gm/ml
จุดหลอมตัว	0	3.81	, °c
จุดเดือด	100.0	101.43	, °c
อุณหภูมิวิกฤต	374.1	371.5	, °c
ความดันวิกฤต	302.6	321.2	, Psia
ความหนาแน่นวิกฤต	19.9	22.7	, lb/ft <sup>3</sup>
Abundance	99.9854	0.0146	*
Moderation Ratio	72	12000	-

#### 2.4 แหล่งน้ำชนิดหนัก

น้ำชนิดหนักมีอยู่ในธรรมชาติโดยเฉลี่ยประมาณ 1 ใน 7000 ส่วน โดยปนอยู่กับน้ำธรรมดา ในน้ำทะเลจะมีดีวเทอริียมประมาณ 0.0156 a/o ส่วนไอน้ำในบรรยากาศเหนือทะเลที่ภาวะสมดุล จะมีปริมาณดีวเทอริียมน้อยกว่าในน้ำประมาณ 7% เนื่องจากความดันไอของ  $H_2O$  สูงกว่า  $HDO$  โดยเหตุนี้ น้ำในบริเวณต่าง ๆ ที่เกิดจากการกลั่นตัวเป็นฝน หรือเป็นเกล็ดน้ำแข็ง จึงมีปริมาณของ  $HDO$  ไม่เท่ากัน เนื่องจากภาวะเงื่อนไขในการระเหยไป (Evaporation) และการตกกลับคืนลงมา (Precipitation) แตกต่างกันไปตามสภาพภูมิอากาศ แหล่งน้ำ ณ ที่ต่าง ๆ จึงมีปริมาณของน้ำชนิดหนักไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลต่อการสร้างโรงงานผลิต เพราะปริมาณใน feed เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีผลต่อราคาต้นทุนการผลิต

#### ตารางที่ 2.3

ปริมาณดีวเทอริียมในแหล่งน้ำธรรมชาติ ณ ที่ต่าง ๆ ของโลก ( 20 )

	Atom ppm deuterium
Mid-Atlantic Ocean at equator	156.0
Bering Sea	154.0
West coast of Greenland	151.6
Columbia at Trail, B.C., 1943	132.9
Missouri at Kansas City, Kan., 1948	137.5
Rio Grande at Mission, Tex., 1948	152.8
Danube River, Regensburg, Germany	144.4
Hudson River	147.2
Niagara River	148.3
Gulf of Suez, Red Sea	158.8
White Nile, Khartoum, Sudan	163.2

ในประเทศไทยมีผู้สำรวจปริมาณน้ำชนิดหนัก ในแหล่งต่าง ๆ ไว้บ้างแล้ว  
และพบว่าบางแหล่งมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็น feed ได้

ตารางที่ 2.4

ปริมาณดิวเทอเรียมในแหล่งน้ำธรรมชาติในประเทศไทย ( 1 )

ตัวอย่างน้ำจากที่ต่าง ๆ	Total Dissolved Solid (PPM)	D <sub>2</sub> O ± σ (a/o)
น้ำทะเล อ. เมือง จ. ระยอง	2.8	0.015 ± 0.006
แม่น้ำโขง อ. เมือง จ. นครพนม	2.2	0.031 ± 0.006
สารละลายอิเล็กโทรไลต์จาก กรมวิทยาศาสตร์ทหารบก	1.9	0.112 ± 0.006
น้ำทะเล ปากพื้ง จ. นครศรีธรรมราช	1.4	0.020 ± 0.006
กว้านพะเยา อ. เมืองพะเยา จ. พะเยา	1.7	0.020 ± 0.000
บ่อน้ำร้อน อ. แม่แจ่ม จ. เชียงใหม่ (90°C)	2.1	0.044 ± 0.006
บ่อน้ำร้อน อ. พาน จ. เชียงราย (75°C)	2.0	0.018 ± 0.006
เขื่อนอุบลรัตน์ จ. ขอนแก่น	3.1	0.018 ± 0.006
น้ำทะเล ต. บางพระ อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี	1.4	0.023 ± 0.006
น้ำทะเล อ. บางละมุง จ. ชลบุรี	1.6	0.020 ± 0.006
แม่น้ำสะแกกรัง อ. เมือง จ. อุทัยธานี	1.9	0.015 ± 0.006
แม่น้ำน้อย จ. อ่างทอง	1.1	0.010
แม่น้ำท่าจีน อ. บางเลน จ. นครปฐม	0.9	0.015 ± 0.006
น้ำฝน กรุงเทพมหานคร	1.6	0.012 ± 0.006
แม่น้ำเจ้าพระยา อ. เมือง จ. นนทบุรี	3.1	0.015 ± 0.000
น้ำพุร้อนบ้านแม่ใจ อ. ผาง จ. เชียงใหม่ 100°C (หตุม 2)	2.1	0.036 ± 0.006

## 2.5 อุตสาหกรรมการผลิตน้ำชนิดหนัก

อุปสงค์ (demand) ของน้ำชนิดหนักขึ้นกับขนาดกำลังผลิตของ ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้เป็นหลักสำคัญ ในประเทศที่ดำเนินการพาณิชย์นิวเคลียร์ อาจจะมีอุตสาหกรรมผลิตน้ำชนิดหนักในปริมาณมาก เพื่อบริการแก่ลูกค้าส่วนประเทศที่พึ่งตนเอง ก็จะสร้างโรงงานที่มีกำลังผลิตสนองความต้องการภายในประเทศ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วจะต้องใช้น้ำชนิดหนัก 1 ตัน ต่อหน่วยกำลังไฟฟ้า 1 MWe เมื่อเริ่มเดินเครื่องปฏิกรณ์ และจะต้องเติมซดเซสส่วนที่สูญเสียไปอีกประมาณ 5% ของปริมาณเริ่มต้นทุกปี จนกว่าจะหมดอายุปฏิกรณ์ ซึ่งยาวนานประมาณ 30 ปี

โรงงานผลิตน้ำชนิดหนักที่สร้างขึ้นทั้งในประเทศที่มีอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ และประเทศที่ผลิตขึ้นเพื่อสนองอุปทาน (supply) ในประเทศ มีต้นแบบกระบวนการผลิตและกำลังผลิตที่แตกต่างกันไป ดังปรากฏในตารางที่ 2.5

### ตารางที่ 2.5

โรงงานผลิตน้ำชนิดหนัก ( 20 )

ที่ตั้ง, ประเทศ	ปีที่ เริ่มผลิต	กำลังผลิต ตัน/ปี	กระบวนการผลิต
1. Rjukan & Glomfjord, Norway	1934 Oper.	12	WE + SH, WD
2. Morgantown, W. Va., United States	1943 1945	3	WD WE
3. Childersburg, Ala., United States	1943 1945	5	WD, WE
4. Dana, Ind., United States	1943 1945	8	WD, WE
5. Trail, B.C., Canada	1944 1956	6	WE + SH, WE

## ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

## โรงงานผลิตน้ำชนิดหนัก

ที่ตั้ง, ประเทศ	ปีที่เริ่มผลิต	กำลังผลิต ตัน/ปี	กระบวนการผลิต
6. Dana, Ind., United States	1952 1958	490	GS, WD, WE
7. Savannah River, S.C., United States	1952 Oper.	Originally 480, reduced to 69	GS, WD
8. Hoechst, Germany	1958 1960	6	SD, HD
9. Toulouse, France	1958 1960	2	SD, HD
10. Dmat Ems, Switzerland	1960 1967	2	WE + HD, WD
11. Nangal, India	1962 Oper.	14	WE, HD
12. Mazingarbe, France	1968 1972	26	AH1 AD
13. Port Hawkesbury, Canada	1970 Oper.	400	GS, WD
14. Bruce A, Canada	1973 Oper.	800	GS, WD
15. Gkace Bay, Canada	1976 Oper.	400	GS, WD
16. Baroda, India	1979	67	AH1, AH1
17. Kota, India	1980	100	GS, WD
18. Tuticorin, India	1979	71	AH1, AH1
19. Talcher, India	1979	63	AH2, WD
20. Bruce B, Canada	1979	800	GS, WD
21. La Prade, Canada	Planned	800	GS, WD
22. Bruce D, Canada	Planned	800	GS, WD

Processes: AD, ammonia distillation; AH1, monothermal ammonia-hydrogen exchange; AH2, dual-temperature ammonia-hydrogen exchange; GS, Girdler-sulfide, dual-temperature, water-hydrogen sulfide exchange; HD, hydrogen distillation; SD, ammonia synthesis gas distillation; SH, steam-hydrogen exchange; WD, water distillation; WE, water electrolysis.



### ข้อมูลจากการวิเคราะห์โรงงานผลิตน้ำชนิดหนักพบว่า

- ก. โรงงานผลิตน้ำชนิดหนัก เกือบทั้งหมดใช้กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นในขั้นตอนและขั้นตอนสุดท้ายแตกต่างกัน
- ข. โรงงานที่ผลิตโดยใช้กระบวนการกลั่นน้ำ (WD) และการแลกเปลี่ยนไอโซโทประหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับน้ำ (GS process) เป็นโรงงานที่ผลิตน้ำชนิดหนักโดยตรง
- ค. โรงงานที่ผลิตโดยใช้กระบวนการ การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (WE) การแลกเปลี่ยนระหว่างไอน้ำกับไฮโดรเจน (SH) การกลั่นก๊าซสังเคราะห์ (SD) การกลั่นไฮโดรเจน (HD) หรือการแลกเปลี่ยนระหว่างแอมโมเนียกับไฮโดรเจน (AH) เป็นโรงงานผลิตน้ำชนิดหนักที่สร้างขึ้นควบคู่กับโรงงานผลิตแอมโมเนีย ซึ่งจะได้น้ำชนิดหนักเป็นผลพลอยได้ และกำลังผลิตถูกจำกัดด้วยปริมาณของแอมโมเนียที่ใช้เป็น feed
- ง. เมื่อเทียบโดยสัดส่วนของปริมาณการผลิตน้ำชนิดหนัก ปรากฏว่า 90% ผลิตโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับน้ำ 6% ผลิตโดยกระบวนการการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้า และการแลกเปลี่ยนระหว่างไอน้ำกับไฮโดรเจน, 2% ผลิตโดยกระบวนการกลั่นไฮโดรเจน และก๊าซสังเคราะห์, 1% ผลิตโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนระหว่างแอมโมเนียกับไฮโดรเจน และ 0.3% ผลิตโดยกระบวนการกลั่นน้ำ

#### 2.6 การผลิตน้ำชนิดหนักในประเทศไทย

แม้ว่าในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบที่ใช้้ำชนิดหนัก มีเพียงปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำธรรมดาขนาดเพียง 2 MW เพื่อใช้ในการวิจัย ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ บางเขน กรุงเทพมหานคร แต่การริเริ่มเพื่อสร้างความสามารถทางนิวเคลียร์ (nuclear capability) ในด้านการผลิตน้ำชนิดหนัก เป็นความจำเป็นด้านหนึ่งที่จะเป็นฐานมุ่งไปสู่การพึ่งตนเองได้ในเชิงนิวเคลียร์ในอนาคต เมื่อมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานชนิดนี้ ความจำเป็นรีบด่วนในการเริ่มต้นสั่งสมนิวเคลียร์เทคโนโลยีด้านนี้ อาจมองตัวอย่างได้จากประเทศอินเดียซึ่งเริ่มต้นศึกษากันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1954 และได้นำมาใช้จริงเมื่อพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้ไปเป็นเวลาถึง 2 ทศวรรษทีเดียว

จากการสำรวจเอกสารทางวิชาการ เกี่ยวกับการผลิตน้ำชนิดหนักในประเทศไทย ไม่ปรากฏหลักฐานว่ามีผู้ใดศึกษาทดลองไว้เลย แต่จากคำบอกเล่าของอาจารย์อาวุโสบางท่าน ในคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้กล่าวถึง หลวงพรตพิทยพยัต ซึ่งเป็นเพื่อนกับ Rutherford ในสมัยเมื่อกว่า 30 ปีมาแล้ว เคยสร้างเครื่องมือผลิตน้ำชนิดหนัก ขนาด Lab. scale แต่ไม่ปรากฏหลักฐานและข้อมูลในการศึกษาวิจัยหลงเหลืออยู่เลย

การวิจัย เรื่องการพัฒนากระบวนการผลิตน้ำชนิดหนักโดยการแลกเปลี่ยนไอโซโทป ระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับน้ำ เรื่องนี้จึงนับว่าเป็นจุดเริ่มต้นของความพยายามที่จะก่อร่าง เทคโนโลยีการผลิตวัสดุนิวเคลียร์ขึ้นในประเทศไทยอีกแขนงหนึ่ง เพื่อไปประสานกับนิวเคลียร์ เทคโนโลยีด้านอื่น อันจะเป็นประโยชน์แก่ประเทศชาติต่อไปในอนาคต