



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำหนักหนัก

ถ้าหากมองดูคุณสมบัติทั่ว ๆ ไป ไม่ว่าจะ เป็นสถานะ สี กลิ่น รส และการละลายแล้ว น้ำหนักหนัก (Heavy Water) ก็ไม่แตกต่างอะไรไปจากน้ำธรรมดาที่ใช้บริโภคกันอยู่ แต่ที่น้ำหนักหนัก เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และผลิตขึ้นเพื่อบรรจุเข้าไว้ในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ให้ทำหน้าที่เป็นตัวหน่วง (moderator) นิวตรอนที่พุ่งออกจากปฏิกิริยาแตกตัวทางนิวเคลียร์ (nuclear fission reaction) ซึ่งจะช่วยให้นิวเคลียสของเชื้อเพลิงยูเรเนียม สามารถจับนิวตรอนไว้ได้ และก่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่อย่างต่อเนื่องกันไป คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ที่สามารถหน่วงนิวตรอนได้ดี และไม่ดูดจับนิวตรอนไว้เอง เป็นบทบาทสำคัญที่ทำให้มีการผลิตน้ำหนักหนัก สำหรับใช้ในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ อีกทั้งน้ำหนักหนัก ยังทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อน (Coolant) ได้ดีอีกด้วย

ตารางที่ 2.1

คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของน้ำหนักหนัก เปรียบเทียบกับสารชนิดอื่น (16)

<u>สาร</u>	<u>Moderation Ratio</u>	<u>Thermal Absorption Crosssection (barn)</u>
น้ำธรรมดา	72	-
ไฮโดรเจน	-	0.332
น้ำหนักหนัก	12000	-
ดีวเทอเรียม	-	0.0005
เบอริลเลียม	125	0.01
กราไฟต์	205	0.0038
ฮีเลียม	45	0.0
ยูเรเนียม	0.009	7.68
ออกซิเจน	-	0.0002

ในธรรมชาติ ธาตุไฮโดรเจน มี 3 ไอโซโทป คือ protium (${}^1_1\text{H}$) , deuterium (${}^2_1\text{H}$) และ tritium (${}^3_1\text{H}$) protium เป็นไอโซโทปที่พบทั่วไป นิวเคลียสประกอบด้วย 1 โปรตรอน เมื่อ รวมตัวกับออกซิเจนจะเกิดเป็นสารประกอบ คือ น้ำธรรมดา (H_2O) ส่วนนิวเคลียส ของ deuterium ประกอบด้วย 1 โปรตรอน และ 1 นิวตรอน จึงหนักเป็น 2 เท่า ของ protium โดยประมาณ เมื่อรวมตัว กับ ออกซิเจน จึงเกิดเป็นน้ำหนักหนัก (Heavy Water) มีชื่อทางเคมี ว่า D_2O หรือ deuterium oxide ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติในปริมาณที่น้อยเหลือเกิน ส่วนนิวเคลียสของ tritium ประกอบด้วย 1 โปรตรอน และ 2 นิวตรอน เป็นไอโซโทปที่หนักที่สุด เมื่อเทียบกับ ไอโซโทปของ Hydrogen และยังเป็นสารกัมมันตรังสี (radioactive) อีกด้วย พบใน บรรยากาศในปริมาณน้อยนิด เนื่องจากธาตุไฮโดรเจน มี 3 ไอโซโทป และธาตุออกซิเจนก็มี 3 ไอโซโทป จึงเป็นไปได้ที่จะสามารถรวมตัวเป็นน้ำชนิดต่าง ๆ กัน ได้ถึง 18 ชนิด ที่เดียว

Harold C. Urey และคณะ เป็นผู้ค้นพบ deuterium ในปี ค.ศ. 1932 โดยการระเหยไฮโดรเจนเหลว แล้วตรวจสอบโดยวิธี optical spectrography พบว่า ส่วน residue คือ deuterium การค้นพบนี้ ทำให้ Urey ได้รับรางวัลโนเบล ในปี ค.ศ. 1934 แม้ว่าผู้ที่ทำนายไว้ว่า มีไอโซโทปดังกล่าว คือ Rutherford จะเสนอไว้ ตั้งแต่ ค.ศ. 1920 แล้วก็ตาม

2.2 บทบาทและความสำคัญของน้ำชนิดหนัก

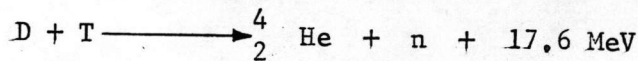
นับตั้งแต่มีการพบนิวเคลียสของ deuterium เป็นต้นมา การวิจัยในเชิงประยุกต์ เพื่อนำไป ใช้ประโยชน์ก็มีมากขึ้นโดยลำดับ ซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้

2.2.1 ในปฏิกิริยาแตกตัวทางนิวเคลียร์ (Nuclear Fission Reaction)

เนื่องจากคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของน้ำชนิดหนัก มีค่า moderating ratio) สูง และค่า capture cross section ต่ำ สำหรับ thermal neutron จึงใช้เป็น moderator ในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้เป็นอย่างดี เพราะสามารถใช้เชื้อเพลิง ยูเรเนียมธรรมชาติ ซึ่งมียูเรเนียม ^{235}U เพียง 0.711% ได้ และทำให้ขนาดของ ปฏิกรณ์เล็กลงอีกด้วย นอกจากนี้ ในปฏิกรณ์บางชนิด ยังใช้น้ำชนิดหนัก เป็นตัวทำละลาย (solvent) แก๊สของยูเรเนียม และ พลูโทเนียม อีกด้วย

2.2.2 ในปฏิกิริยาหลอมตัวทางนิวเคลียร์ (Nuclear Fusion Reaction)

นอกจากดีวเทอเรียมจะเป็นสารสำคัญในตัวยูโทเนียมนิวเคลียร์ที่ใช้ Heavy Water เป็น moderator แล้ว ดีวเทอเรียมเอง ยังเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ในปฏิกิริยาแบบหลอมตัว (Fusion reaction) กล่าวคือ ในภาวะพลาสมา (plasma state) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ ประมาณ 100 ล้านองศาเซลเซียส ดีวเทอเรียม และ ทริเทียม ซึ่งอยู่ในสภาพเป็นไอออน (ion) จะมีพลังงานสูงเกินกว่าแรงผลักระหว่างนิวเคลียส ทำให้หลอมตัวรวมกันเข้า เป็นผลให้อยู่ในภาวะเร้าตัวอย่างยิ่ง (highly excited state) จึงปลดปล่อยพลังงานออกมาถึง ประมาณ 17.6 MeV. พร้อมกับนิวตรอน 1 อนุภาค ในชั่วเวลา 1 ในร้อยล้านล้านวินาที ส่วนอนุภาคที่เหลืออยู่ จะรวมตัวเกิดเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม พลังงาน 80% ที่แผ่มาจากนิวตรอน จะถูกจับและถ่ายทอดไว้ที่กำบังลิเทียม (lithium blanket) แล้วถ่ายเทไปแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ ยังอยู่ในระหว่างการวิจัยประยุกต์



ปฏิกิริยาหลอมตัวทางนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นโดยใช้ดีวเทอเรียมและทริเทียมเป็นเชื้อเพลิง

พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยานี้ คิดเทียบแล้ว ประมาณ 247 พันล้าน BTU/lb ปริมาณดีวเทอเรียมที่มีอยู่ในโลก ประมาณ 10^{17} ปอนด์ รวมแล้วจะให้พลังงานได้ทั้งหมด ถึง 2.5×10^{28} BTU ซึ่งถ้าหากเทียบกับอัตราการบริโภคพลังงานในปัจจุบัน จะใช้ไปได้ นานถึง 10^{11} ปี

2.2.3 ในด้านการศึกษาวิจัยทางวิทยาศาสตร์

เนื่องจาก Heavy Water มีคุณสมบัติทั้งที่เหมือน และต่างไปจาก น้ำธรรมดา จึงสามารถประยุกต์ไปใช้ศึกษาคุณสมบัติของสาร หรือปฏิกิริยาบางอย่างได้ เช่น การศึกษาคุณสมบัติทางชีวภาพ ของ DNA. และกระบวนการเมตาบอลิซึม ของ

สารชีวเคมีในเซลล์ โดยใช้เป็น tracer หรือใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ในการทำ hydrolysis สารอินทรีย์บางชนิด รวมทั้ง การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ของ สารประกอบ hydride ที่ต่างไอโซโทป อีกด้วย

2.3 คุณสมบัติของน้ำชนิดหนัก

แม้ว่าคุณสมบัติโดยทั่วไปของน้ำชนิดหนัก จะเกือบเหมือนกับน้ำธรรมดา แต่เนื่องจาก ความแตกต่างของไอโซโทป ของ ไฮโดรเจนในองค์ประกอบ ทำให้เกิดความแตกต่างของ คุณสมบัติทางกายภาพ ดังประมวลไว้ใน ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

เปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำธรรมดากับน้ำชนิดหนัก (5)

<u>คุณสมบัติ</u>	<u>น้ำ(H₂O)</u>	<u>น้ำชนิดหนัก (D₂O)</u>	<u>หน่วย</u>
น้ำหนักโมเลกุล	18.016	20.029	-
ค่าดัชนีหักเห	1.333	1.328	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.00	1.107	-
ความหนาแน่น ที่ 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	' P sia
ความหนาแน่นวิกฤต	19.9	22.7	' lb/ft ³
Abundance	99.9854	0.0146	%
Moderation Ratio	72	12000	-

014309

2.4 แหล่งน้ำชนิดหนัก

น้ำชนิดหนักมีอยู่ในธรรมชาติโดยเฉลี่ยประมาณ 1 ใน 7000 ส่วน โดยปนอยู่กับน้ำธรรมดา ในน้ำทะเลจะมีคิวเทอริยมประมาณ 0.0156 a/o ส่วนไอ้ในบรรยากาศเหนือทะเลที่ภาวะสมดุล จะมีปริมาณคิวเทอริยมน้อยกว่าในน้ำประมาณ 7% เนื่องจากความดันไอของ H_2O สูงกว่า HDO โดยเหตุนี้ น้ำในบริเวณต่าง ๆ ที่เกิดจากการกลั่นตัวเป็นฝน หรือเป็นเกล็ดน้ำแข็ง จึงมีปริมาณของ HDO ไม่เท่ากัน เนื่องจากภาวะเงื่อนไขในการระเหยไป (Evaporation) และการตกกลับคืนลงมา (Precipitation) แตกต่างกันไปตามสภาพภูมิอากาศ แหล่งน้ำ ๗ ที่ต่าง ๆ จึงมีปริมาณของน้ำชนิดหนักไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลต่อการสร้างโรงงานผลิต เพราะปริมาณใน Feed เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีผลต่อราคาต้นทุนการผลิต

ตารางที่ 2.3

ปริมาณคิวเทอริยมในแหล่งน้ำธรรมชาติ ๗ ที่ต่าง ๆ ของโลก (4)

	<u>Atom ppm deuterium</u>
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 และพบว่า บางแหล่งมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็น Feed ได้

ตารางที่ 2.4

ปริมาณดีวีเทอเรียมในแหล่งน้ำธรรมชาติในประเทศไทย (2)

<u>ตัวอย่างน้ำจากที่ต่าง ๆ</u>	<u>Total Dissolved Solid (PPM)</u>	<u>D₂O ± σ (a/o)</u>
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 ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช	1.4	0.020 ± 0.006
กว๊านพะเยา 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.ฝาง จ.เชียงใหม่		
100°C (หลุม 2)	2.1	0.036 ± 0.006

2.5 อุตสาหกรรมการผลิตน้ำชนิดหนัก

อุปสงค์ (demand) ของน้ำชนิดหนัก ขึ้นกับขนาดกำลังผลิต ของ ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ที่ใช้ เป็นหลักสำคัญ ในประเทศที่ดำเนินการพาณิชย์นิวเคลียร์ อาจจะมีอุตสาหกรรมผลิต น้ำชนิดหนัก ในปริมาณมาก เพื่อบริการแก่ลูกค้า ส่วนประเทศที่พึ่งตนเองก็จะสร้างโรงงาน ที่มีกำลังผลิตสนองความต้องการภายในประเทศ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้ว จะต้องใช้น้ำชนิดหนัก 1 ตัน ต่อหน่วยกำลังไฟฟ้า 1 MWe. เมื่อเริ่มเดินเครื่องปฏิกรณ์ และจะต้องเติมสดเชยส่วนที่ สูญเสียไป อีกประมาณ 5% ของปริมาณเริ่มต้น ทุกปี จนกว่าจะหมดอายุปฏิกรณ์ ซึ่งยาวนาน ประมาณ 30 ปี

โรงงานผลิตน้ำชนิดหนักที่สร้างขึ้น ทั้งในประเทศที่มีอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ และ ประเทศที่ผลิตขึ้นเพื่อสนองอุปทาน (supply) ในประเทศ มีต้นแบบกระบวนการผลิต และ กำลังผลิตที่แตกต่างกันไป ดังปรากฏใน ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5

โรงงานผลิตน้ำชนิดหนัก (4)

<u>ที่ตั้ง, ประเทศ</u>	<u>ปีที่ เริ่มผลิต</u>	<u>กำลังผลิต</u> <u>ตัน/ปี</u>	<u>กระบวนการผลิต</u>
1. Rjukan & Glomfjord, Norway	1934 Oper.	12	WE + SH, WD
2. Norgantown, W. Va., United States	1943 1945	3	WD WE
3. Childersburd, 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 (4)

ที่ตั้ง, ประเทศ	เริ่มผลิต	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. Domat 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

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

โรงงานผลิตน้ำขี้ดหนัก

ที่ตั้ง, ประเทศ	ปีที่เริ่มผลิต	กำลังผลิต ตัน/ปี	กระบวนการผลิต
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.



ข้อมูลจากการวิเคราะห์โรงงานผลิตน้ำชนิดหนัก พบว่า

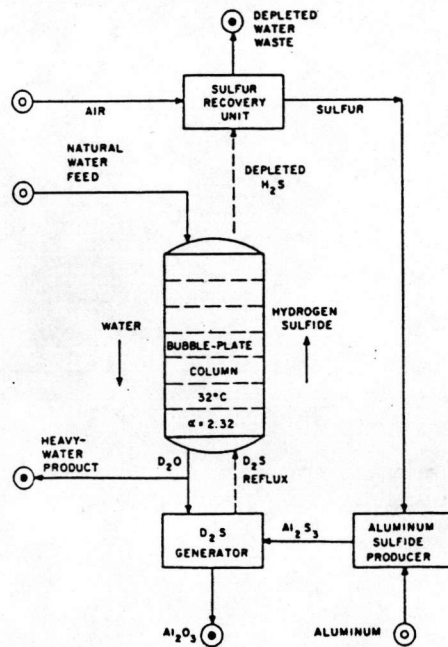
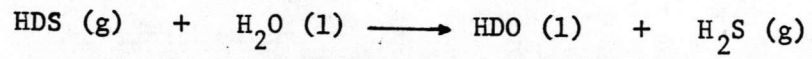
- ก. โรงงานผลิตน้ำชนิดหนัก เกือบทั้งหมด ใช้กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นดิน และชั้นสุดท้าย แตกต่างกัน
- ข. โรงงานที่ผลิตโดยใช้กระบวนการกลั่นน้ำ (WD) และการแลกที่ไอโซโทป ระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์ กับ น้ำ (GS process) เป็นโรงงานที่ผลิตน้ำชนิดหนักโดยตรง
- ค. โรงงานที่ผลิตโดยใช้กระบวนการ การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (WE) การแลกที่ ระหว่างไอน้ำ กับ ไฮโดรเจน (SH) การกลั่นก๊าซสังเคราะห์ (SD) การกลั่นไฮโดรเจน (HD) หรือ การแลกที่ระหว่างแอมโมเนีย กับ ไฮโดรเจน (AH) เป็นโรงงานผลิตน้ำชนิดหนักที่สร้างขึ้น ควบคู่กับโรงงานผลิตแอมโมเนีย ซึ่งจะได้น้ำชนิดหนัก
- ด เป็นผลพลอยได้ และกำลังผลิตถูกจำกัดด้วยปริมาณของแอมโมเนีย ที่ใช้เป็น feed
- ง. เมื่อเทียบโดยสัดส่วนของปริมาณการผลิตน้ำชนิดหนัก ปรากฏว่า 90% ผลิตโดยกระบวนการแลกที่ระหว่าง ไฮโดรเจนซัลไฟด์ กับ น้ำ 6% ผลิตโดยกระบวนการการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้า และการแลกที่ ระหว่าง ไอน้ำ กับ ไฮโดรเจน, 2% ผลิตโดยกระบวนการกลั่นไฮโดรเจน และก๊าซสังเคราะห์, 1% ผลิตโดยกระบวนการแลกที่ ระหว่างแอมโมเนีย กับ ไฮโดรเจน และ 0.3% ผลิตโดยกระบวนการกลั่นน้ำ

2.6 อะลูมิเนียมซัลไฟด์ (Al_2S_3)

อะลูมิเนียมซัลไฟด์ (Al_2S_3) เป็นสารประกอบทางเคมีชนิดหนึ่ง เป็นของแข็งสีเหลืองเทา เป็นสารเคมีที่ให้ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะสลายตัว เป็นผงสีเทา

- น้ำหนักอะตอม 150.16
- ความถ่วงจำเพาะ 2.02 ที่ 13 เซลเซียส
- จุดหลอมเหลว 1100 เซลเซียส
- จุดเดือด 1550 เซลเซียส

การผลิตอะลูมิเนียมซัลไฟด์ (Al_2S_3) เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตน้ำชนิดหนักแบบ GS นั้น สารตั้งต้นที่สำคัญในการผลิตน้ำชนิดหนัก คือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (HDS) เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยน ระหว่าง ดิวทีเรียม (2_1D) ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ ประมาณ 0.015% จาก HDS กับ โปรเทียม (1_1H) ในน้ำ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



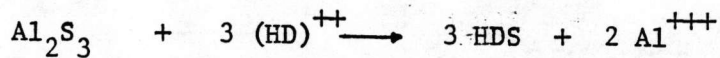
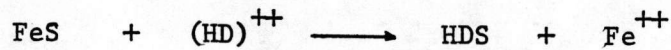
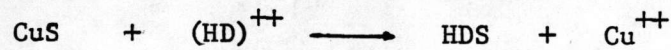
รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างกระบวนการแลกเปลี่ยนที่ไอโซโทป.

ดีวเทอเรียมในน้ำ กับ ไฮโดรเจนซัลไฟด์

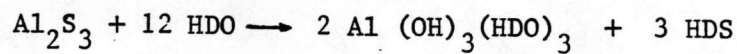
แผนผังแสดงการใช้ H₂S จากอะลูมิเนียมซัลไฟด์ในการผลิตน้ำชนิดหนัก

โดยกระบวนการ GS ดังรูป 2.1

สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยทั่วไป ได้จาก โลหะซัลไฟด์ ทำปฏิกิริยากับ กรด หรือ น้ำ เช่น

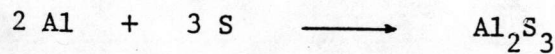


จากปฏิกิริยาข้างต้น จะเห็นว่า จำนวนโมล ของ HDS ที่ได้สูงสุด จากปฏิกิริยาการผลิต HDS ของ Al_2S_3 คือ ใช้ 1 โมล ของ Al_2S_3 จะได้ 3 โมล ของ HDS ดังสมการ



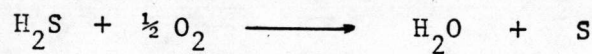
$$H = - 113.95 \text{ Kcal/mol at } 298.15 \text{ K.}$$

จากการศึกษาข้อมูล วิธีการเตรียม Al_2S_3 โดยใช้โลหะอะลูมิเนียม และกำมะถัน ทำปฏิกิริยากับกระบวนการ Thermic process ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย หรือ ออกซิเจนน้อย ที่อุณหภูมิ ประมาณ 650 - 1100 องศาเซลเซียส ดังสมการ

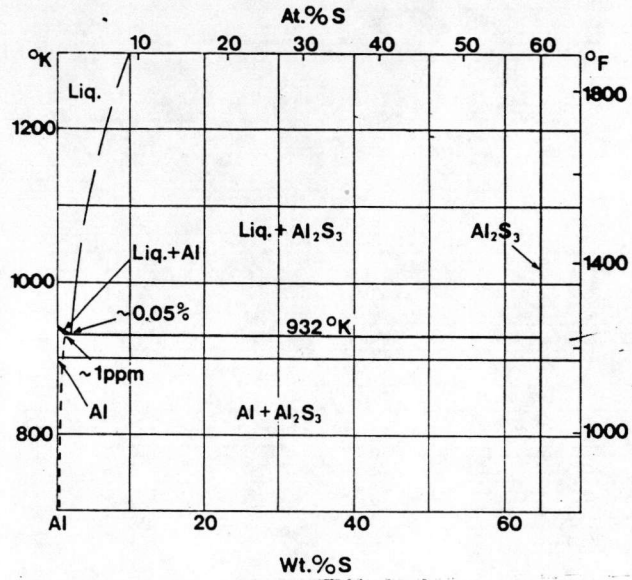


$$\Delta H_f (298.15 \text{ K.}) = - 155.57 \pm 0.76 \text{ Kcal mole}^{-1}$$

และการนำกำมะถันส่วนหนึ่งกลับจากกระบวนการ GS ดังสมการ



โดยวิธี partial combustion ในอากาศ



รูปที่ 2.2 The aluminum end of the aluminum-sulfur equilibrium diagram

อะลูมิเนียมซัลไฟด์ (Al_2S_3) มี 3 อัญรูป (phase) คือ

1. α (Al_2S_3) มี 64.07 Wt % S อยู่ในรูป Hexagonal จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า $1100^\circ K$. มีความหนาแน่น 2320 Kg/m^3
2. γ (Al_2S_3) AlS มี 54.3 Wt % s อยู่ในรูป rhombohedral ที่ $1350^\circ K$
3. β (Al_2S_3) Al_2S มี 37.3 Wt % S อยู่ในรูป Hexagonal ความหนาแน่น 2550 Kg/m^3 ซึ่งจะเกิดที่อุณหภูมิสูง ($\sim 1800 \text{ K.}$) ซึ่งจะเกิดร่วมกับ C_2Al_4 ในขณะที่เป็นก๊าซ