รายงานวิชาการ
ฉบับที่ สอพ. 18/2547

ซิลิคอน

นางสาวเบญจพร พวงจำปี

สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

อธิบดีกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
นายอนุสรณ์ เนื่องผลมาก

ผู้อำนวยการสำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน
นายมณฑป วัลยะเพ็ชร์

หัวหน้ากลุ่มเทคโนโลยีโลหวิทยา
นายปราโมทย์ ภูพานทอง

จัดพิมพ์โดย กลุ่มเทคโนโลยีโลหวิทยา สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
ถนนพระราม 6 เขตราชเทวี กรุงเทพ ฯ 10400
โทรศัพท์ 662 202 3616 โทรสาร 662 202 3606

พิมพ์ครั้งที่ 1 ตุลาคม 2547
จำนวน 10 เล่ม

ข้อมูลการลงรายการบรรณานุกรม

เบญจพร พวงจำปี.
ซิลิคอน / โดย เบญจพร พวงจำปี. กรุงเทพ ฯ :
กลุ่มเทคโนโลยีโลหวิทยา สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ , 2547.
จำนวน 30 หน้า.
รายงานวิชาการ ฉบับที่ สอพ. 18/2547
ISBN 974-7782-31-6

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	V
คำขอบคุณ	VI
1. บทนำ	1
2. วัตถุดิบสำหรับการผลิตซิลิคอน (Silicon Metal)	2
3. คุณสมบัติของซิลิคอน	4
4. กระบวนการถลุงซิลิกา (ควอทซ์)	6
▪ ขั้นตอนการทำนำแร่ควอทซ์มาเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตซิลิคอน	7
▪ วิธีทางฟิสิกส์	10
▪ วิธีทางเคมี	11
5. ปริมาณวัตถุดิบตั้งต้น และเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิต	15
▪ กระบวนการถลุง	15
▪ กระบวนการทำซิลิคอนให้บริสุทธิ์	16
6. กรณีศึกษากระบวนการผลิตโลหะซิลิคอน (Silicon Metal) ในระบบปิด	18
▪ อุตสาหกรรมการผลิตซิลิคอน	18
7. การนำซิลิคอนบริสุทธิ์ไปใช้ประโยชน์	22
8. ราคาโลหะซิลิคอนเกรดต่าง ๆ	23
9. สถานการณ์ทางการตลาดของโลหะซิลิคอน และเฟอโรซิลิคอน	24
10. สรุป	27
11. เอกสารอ้างอิง	29

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1. แร่ควอทซ์	4
2. โครงสร้างผลึกซิลิคอน	4
3. แสดงขั้นตอน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ของการถลุงซิลิกา	7
4. ขั้นตอนการถลุงซิลิกา	8
5. แสดงภายในเตาถลุง	9
6. แท่งซิลิคอนเกรดโลหะ (Metallurgy Silicon Grade : SiMG)	10
7. แสดงส่วนของแท่งซิลิคอนที่นำมาใช้ในการผลิตเกรดสารกึ่งตัวนำ	10
8. แสดงการนำ SiMG มาผ่านกระบวนการทางฟิสิกส์เพื่อให้ได้ซิลิคอน เกรดสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น	11
9. กระบวนการทำ polycrystalline silicon	12
10. แสดงขั้นตอนการผลิตซิลิคอน (Solar Cell Grade) ด้วย Czochralski Process	13
11. แสดงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	13
12. แสดงขั้นตอนการผลิตซิลิคอนบริสุทธิ์เกรดสารกึ่งตัวนำ โดยมีวัตถุดิบตั้งต้น เป็นซิลิคอนเกรดโลหกรรม	14
13. ถ่านไม้	16
14. แสดงภาพรวมของกระบวนการผลิตโลหะซิลิคอนในระบบปิด	18
15. แสดงขั้นตอนการถลุงซิลิกา และผลผลิตที่เกิดขึ้น	19
16. แสดงกระบวนการผลิตโลหะซิลิคอน รวมถึงของเสียที่เกิดจากกระบวนการ	21
17. สัดส่วนการบริโภคซิลิคอนในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	26

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. แสดงประเภท และคุณลักษณะของควอทซ์ แบ่งตามการนำไปใช้ประโยชน์	3
2. ปริมาณวัตถุดิบ และเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการผลิตซิลิคอนบริสุทธิ์ จากแร่ควอทซ์	17
3. แสดงราคาซิลิคอนตามคุณสมบัติ และการนำไปใช้	23

ซิลิคอน

โดย เบญจพร พวงจำปี

บทคัดย่อ

ซิลิคอน เป็นธาตุที่มีคุณสมบัติเป็นที่ต้องการอย่างมากในอุตสาหกรรม ทั้งในภาคอุตสาหกรรมประกอบโลหกรรม และอุตสาหกรรมเคมี อิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียม อุตสาหกรรมเหล็ก และเหล็กกล้า อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนตัวนำในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แก้ว และกระจก รวมถึงอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยทั่วไปแล้วเรามักไม่พบซิลิคอนบริสุทธิ์ในธรรมชาติ แต่มักพบเป็นสารประกอบร่วมกับออกไซด์ และโลหะต่าง ๆ ในรูปของซิลิกา หรือซิลิเกต ในชั้นเปลือกโลกซึ่งจำนวนมากถึงร้อยละ 26 (โดยน้ำหนัก) รองจากออกซิเจน

เหตุผลประการหนึ่งที่ทำให้ซิลิคอนได้รับความสนใจเนื่องจาก วัตถุดิบตั้งต้นของการผลิตเป็นซิลิกา หรือที่รู้จักกันดี นั่นคือ ทราย ซึ่งเราสามารถพบได้ในทุกแห่งบนโลก แต่ใช่ว่าทรายทุกแห่ง หรือทุกเกรดจะเหมาะสำหรับการนำมาผลิตเป็นซิลิคอนบริสุทธิ์ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการคัดเลือกทรายที่มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุนตั้งโรงงานถลุงซิลิกาให้ได้เป็นซิลิคอนบริสุทธิ์ นั่นเอง

รายงานฉบับนี้ จะกล่าวถึงคุณสมบัติอย่างคร่าว ๆ ของซิลิคอน ขั้นตอนการนำซิลิกามาถลุง และการทำให้บริสุทธิ์ เพื่อให้ได้เป็นซิลิคอนบริสุทธิ์เกรดต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมรายสาขาอันได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

นอกจากนี้ ได้นำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับสถานการณ์ การตลาด ปริมาณการผลิต นำเข้าส่งออก เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้สนใจได้ทราบในเบื้องต้น พร้อมกันนี้ ได้เสนอประมาณการณ์ด้านวัตถุดิบ พลังงาน ผลิตภัณฑ์ ตลอดจนสารอันตรายต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการ ทั้งนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ด้านการประเมินความน่าจะเป็น และความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ การจัดการสิ่งแวดล้อมของสิ่งที่จะต้องเสียไป กับสิ่งที่ได้มา ซึ่งนับได้ว่าเป็นทางเลือกของการเพิ่มมูลค่าทางการตลาดให้แก่วัตถุดิบทางหนึ่ง

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายมณฑป วัลยะเพ็ชร์ ผู้อำนวยการสำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน นายปราโมทย์ ภูพานทอง หัวหน้ากลุ่มเทคโนโลยีโลหวิทยา ที่กรุณาให้คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ด้านโลหวิทยา และการประกอบโลหกรรม รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการถลุงโลหะ อีกทั้ง เป็นผู้ผลักดัน และแนะนำแนวทางการค้นคว้า รวบรวม ให้การจัดทำเอกสารฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ตลอดจนเจ้าหน้าที่กลุ่มเทคโนโลยีโลหวิทยา และพนักงานทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือให้การจัดทำเอกสารเล่มนี้ สำเร็จสมบูรณ์

อนึ่ง หากการจัดทำเอกสารฉบับนี้ มีข้อบกพร่องผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับคำแนะนำด้วยความยินดี

ซิลิคอน

1. บทนำ

ซิลิคอนเป็นธาตุเบาที่มีคุณสมบัติกึ่งโลหะ ตามปกติในธรรมชาติ พบว่าซิลิคอนจะรวมกับออกซิเจนและอะตอมของธาตุอื่นๆ เกิดเป็นซิลิเกต (Silicates) พบได้ในชั้นเปลือกโลกมากกว่าร้อยละ 26 โดยที่ซิลิกา (silica : SiO_2) เองนั้นก็เป็นซิลิเกตชนิดหนึ่ง แต่มีเพียงอะตอมของซิลิคอน และออกซิเจนเป็นส่วนประกอบเท่านั้น ซิลิกา หรือ ทราย ที่รู้จักกันทั่วไป คือ ควอทซ์ หรือ ควอทไซต์ ซึ่งนำมาใช้ผลิตเป็น Si metal สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอะลูมิเนียม และอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ ทั้งนี้ การพิจารณาสัดส่วนของซิลิคอนที่ผสมอยู่ในเนื้อวัสดุเป็นหลัก จะสามารถแบ่งประเภทของซิลิคอน และประโยชน์ที่จะนำไปใช้ ได้แก่

- เฟอโรซิลิคอน Ferrosilicon (Si > ร้อยละ 50) เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเหล็ก เพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งให้กับเนื้อโลหะ ตลอดจนความทนทานสำหรับใช้ในงานด้านโครงสร้าง
- Silicon (regular : Si ร้อยละ 97) เป็นเกรดที่เหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป
- Semiconductor (Hyperpure : Si ร้อยละ 99.97) ซิลิคอนความบริสุทธิ์สูงนี้ เหมาะสำหรับงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตสารกึ่งตัวนำ และเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภท Si metal นั้น เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมต้นน้ำ (Primary Industry) และกลางน้ำ (Secondary Industry) เพื่อการผลิตอะลูมิเนียม และอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น การผลิตซิลิโคน (Silicone) ส่วน Ferrosilicon เกือบทั้งหมดจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก และเหล็กกล้า ซึ่ง Ferrosilicon ที่นิยมนำไปใช้มีด้วยกัน 2 เกรดมาตรฐาน คือ Ferrosilicon ที่มีซิลิคอนเป็นส่วนผสมร้อยละ 50 และ 75 ตามลำดับ

Si metal ที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต้นน้ำ โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติด้านความแข็งมากกว่าที่ใช้ในอุตสาหกรรมกลางน้ำ นอกจากนี้ อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ยังต้องการ Si metal ในรูปผง (powder) มากกว่าแบบก้อน ซึ่งนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียม สำหรับ Si metal ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพ และความบริสุทธิ์ให้สูงขึ้นด้วยการนำไปผ่านกรรมวิธีต่างๆ ทั้งทางฟิสิกส์ และเคมี เพื่อให้ได้ซิลิคอน (silicon metal) เกรดที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ อาทิ สารกึ่งตัวนำในวงจรคอมพิวเตอร์ ไมโครโปรเซสเซอร์ ฯลฯ ต่อไป

2. วัตถุดิบสำหรับการผลิตซิลิคอน (Silicon Metal)

วัตถุดิบที่นำมาใช้เพื่อการผลิตซิลิคอนได้จากซิลิกา หรือ ควอทซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติ และลักษณะเฉพาะ โดยสามารถแบ่งประเภทของซิลิกาออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ นั่นคือ

1. Fine silica ได้แก่ ทรายตามธรรมชาติ (silica sand) และหินทรายร่วน (friable sandstone) ที่เกิดจากการแปรสภาพ การนำไปใช้ประโยชน์ จะอยู่ในรูปของซิลิกาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว กระจก และผลิตภัณฑ์เซรามิก รวมถึงอุตสาหกรรมก่อสร้าง หรือเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์

2. Coarse silica (lump silica) ได้แก่ ควอทซ์ (quartz) หรือควอทซ์ไซต์ (quartzite) ชนิดผลึก และควอทซ์ชนิดเม็ดใหญ่ (quartz gravel) ซึ่งนับได้ว่าเป็นควอทซ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (high purity quartz pebbles) กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ คือ การนำควอทซ์ไปถลุงในเตาไฟฟ้า ได้ผลผลิตเป็น silicon metallurgical grade สำหรับนำไปใช้ประโยชน์หลักในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้

- อุตสาหกรรมอะลูมิเนียม เพื่อใช้เป็นโลหะผสมให้เกิดความแข็งแรงแก่ผลิตภัณฑ์ และสามารถหล่อขึ้นรูปแบบต่างๆ ได้ หรือในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ซึ่งใช้ส่วนประกอบภายในโครงสร้างเป็นอะลูมิเนียม หรือเป็นส่วนเสริม เช่น ล้อ ลูกสูบ เครื่องยนต์ หรือแม้แต่การผลิตกระป๋องอะลูมิเนียมก็ตาม
- อุตสาหกรรมผลิตเหล็ก (เป็นสารจำกัดสิ่งปนเปื้อน : flux)
- อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ซึ่งจะใช้ซิลิคอนที่มีขนาด 25-325 mesh) สำหรับเป็นวัตถุดิบประเภท high purity polycrystalline silicon เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำ ไมโครชิพ ไมโครโปรแพสเซอร์ของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ ต้องการความบริสุทธิ์ของซิลิคอนวัตถุดิบสูงถึงร้อยละ 99.999999
- อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เนื่องจากคุณสมบัติของการทนทานต่ออุณหภูมิ สารเคมี และเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาผลิตเป็นซิลิโคน หรืออาจใช้ในการผลิตเครื่องดื่มโดยเป็นส่วนผสมของโซดา นอกจากนี้ ซิลิคอนคาร์ไบด์ สำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ

นอกจากนี้ fused silica ซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากการถลุงควอทซ์ในกระบวนการนี้ ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในการผลิตวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก

ตารางที่ 1 แสดงประเภท และคุณลักษณะของควอทซ์ แบ่งตามการนำไปใช้ประโยชน์

การนำไปใช้ประโยชน์	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)				ขนาด (มม.)
	SiO_2 min	Al_2O_3 max	Fe_2O_3 max	CaO+MgO max	
ทรายแก้วสำหรับทำแก้ว (glass sand)					
- แว่นตา	99.5	0.1-0.5	0.008	-	0.1-0.5
- เครื่องแก้วใส	99.5	0.1-0.5	0.013	-	0.1-0.5
- ภาชนะบรรจุของ และกระจกแผ่นเรียบ	98.5	0.1-0.5	0.030	-	0.1-0.5
- เซรามิก	98.5	0.1-0.5	0.030	-	0.1-0.5
ทรายแก้วที่ใช้ในงานหล่อโลหะ (foundry sand)	88-99	<----- ไม่กำหนด ----->			0.125-0.85
ซิลิกาบดละเอียด (silica flour)	97-98	0.5	0.200	-	1/1,000
ทรายแก้วที่ใช้ทำซิลิคอนคาร์ไบด์	99.5	0.06-0.25	0.100	-	+0.150
ควอทซ์เพื่อสกัดเป็นซิลิคอน (Si)	98.0	0.4	0.200	0.20	> 25.4 Dia
ควอทซ์ที่ใช้ทำเฟอโรซิลิคอน	96.0	0.4	0.200	-	> 25.4 Dia
ควอทซ์ที่ใช้ทำอิฐทนไฟ	96-98	0.1	-	ต่ำ	-2.36
ควอทซ์ที่ใช้ทำโซเดียมซิลิเกต	99.0	0.25	0.030	0.05	0.150-0.85
ใช้เป็นตัวช่วยในการหลอม (silica flux)	90.0	1.5	1.500	0.20	-6.35, 5%

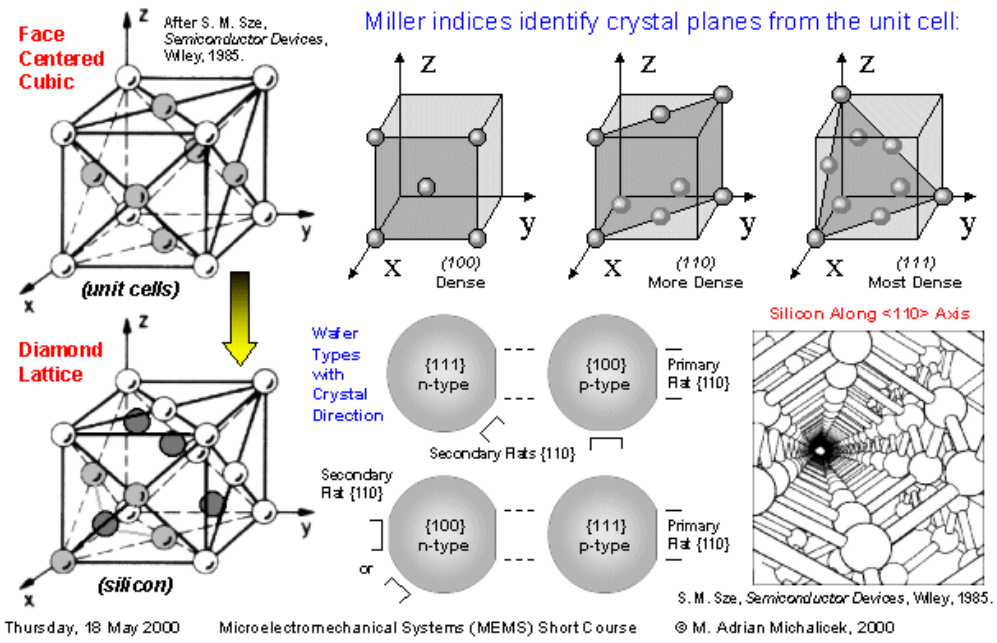
ที่มา : โชติ ตราชู. ควอทซ์ แร่เศรษฐกิจของไทยในยุคน้ำมันแพง, กรมทรัพยากรธรณี : 2544

3. คุณสมบัติของซิลิคอน

ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างแบบผลึก มีสีเทา สมบัติกึ่งโลหะ และเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 ในโลก ปริมาณร้อยละ 25.7 (โดยน้ำหนัก) รองจากออกซิเจน โดยทั่วไปจะไม่พบซิลิคอนบริสุทธิ์ในธรรมชาติ แต่จะพบเป็นสารประกอบออกไซด์ หรือซิลิเกต (มีโลหะผสมอยู่ เช่น แกรไฟต์ แร่ใยหิน เฟลสปาร์ และไมกา เป็นต้น) ในรูปของผลึก ซึ่งมีซิลิคอน 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอม ที่เรารู้จักกันดี คือ ซิลิกา หรือ ควอทซ์ (SiO_2) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 1,710 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 1 แร่ควอทซ์

(ที่มา http://www.davesdowntoearthrockshop.com/quartz.htm)



ภาพที่ 2 โครงสร้างผลึกซิลิคอน

(ที่มา http://mems.colorado.edu/c1.res.ppt/ppt/g.tutorial/slide015.htm)

ซิลิคอนบริสุทธิ์ ได้มาจากการนำซิลิกา (SiO_2) ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 97 ขึ้นไป ถลุงในเตาหลอมไฟฟ้าอุณหภูมิสูง โดยใช้เชื้อเพลิงประเภทคาร์บอน ซึ่งได้จากถ่านไม้ ได้ผลผลิตเป็นซิลิคอนหลอมเหลวเกรดโลหกรรมที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในงานอุตสาหกรรมต่างๆ แต่หากต้องการให้ซิลิคอนที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงยิ่งขึ้น จะต้องนำไปผ่านเข้าสู่กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ด้วยการหลอมซ้ำอีกครั้ง หรือการใช้สารละลายเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก เพื่อให้ได้เป็นซิลิคอนเกรดอิเล็กทรอนิกส์สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตสารกึ่งตัวนำ และอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

สำหรับกรรมวิธีเพื่อให้ได้ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูงเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ นั้น สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การล้างแท่งโลหะซิลิคอนที่ได้จากการถลุงควอทซ์ด้วยกรดเกลือ (HCl) หรือกรดกัดแก้ว (HF) หรือด้วยกรรมวิธีการนำ $SiCl_4$ (silicon tetrachloride) หรือ SiI_4 (silicon tetraiodide, silane) มาทำการกลั่นลำดับส่วน หรือจะเป็นการนำซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการถลุงแร่ควอทซ์ (reduction) มาทำให้บริสุทธิ์ด้วยสังกะสี และอบในเตาสุญญากาศ หรือการทำให้บริสุทธิ์ด้วยแก๊สอาร์กอน

ซิลิคอนที่ได้จึงมีคุณภาพ และความบริสุทธิ์ต่างกัน โดยแบ่งได้ตามสัดส่วนของปริมาณ Si ที่มีในผลิตภัณฑ์นั้นๆ ได้แก่

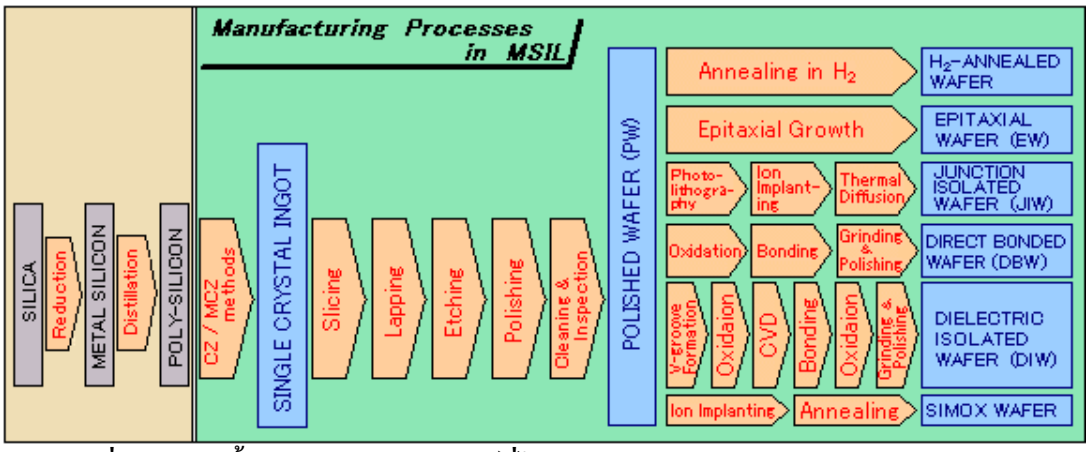
- Ferrosilicon (50% Si)
- Regular/ Silicon Metallurgy Grade (97% Si)
- Semiconductor/ Hyperpure (99.97% Si)

ในขณะที่ซิลิคอนบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 1,410 องศาเซลเซียส ซึ่งถือได้ว่าสูงกว่าโลหะเกือบทุกชนิด สามารถทำปฏิกิริยากับธาตุในหมู่แฮโลเจน และสารละลายด่าง แต่ไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ กับสารละลายกรด ยกเว้นกรดกัดแก้ว ซิลิคอนมีสมบัติการส่งผ่านความยาวคลื่นแสง จึงเป็นเหตุผลให้ซิลิคอนถูกนำมาใช้ประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเลนส์ และอุปกรณ์เกี่ยวกับการมองเห็น นอกจากนี้ ซิลิคอนยังมีสมบัติของการเป็นสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถนำไปผลิตชิ้นส่วนประเภทตัวนำไฟฟ้า และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ต่างๆ ของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนงานด้านอุตสาหกรรมโลหการ ซิลิคอนถูกนำไปใช้เพื่อทำเบ้าหลอมโลหะ หรือเป็นสารเพิ่มความแข็ง ตลอดจน เป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมผลิตแก้ว กระจก และผลิตภัณฑ์เซรามิก แต่หากกล่าวโดยรวมแล้ว ซิลิคอนถูกนำไปใช้ประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรมที่สำคัญ ได้แก่ ในอุตสาหกรรมผลิตอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมอัลลอยด์ คิดเป็นปริมาณมากสุดอันดับ 1 ประมาณ 430,000 – 440,000 ตันทั่วโลก (Dept. of Western Australia, 2002) รองลงมา คือ อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์เพื่อการผลิตซิลิโคน รวมถึงสารกึ่งตัวนำ เช่น ไฟเบอร์ออฟติก และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ประเภท ซิลิคอนเวเฟอร์ในเครื่องใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

วิธีการแยกสกัดเพื่อให้ได้ซิลิคอนบริสุทธิ์ สำหรับนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ สามารถทำได้จากหลายวิธี โดยวิธีพื้นฐาน และเป็นที่รู้จักกันมาอย่างแพร่หลายยาวนาน ได้แก่ การนำแร่ควอทซ์ หรือซิลิกา มาผ่านกระบวนการทางความร้อน (Pyrometallurgy) และขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีทางฟิสิกส์ และเคมี โดยที่กรรมวิธีดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ปัจจุบันจึงได้มีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยต่างๆ เข้ามาเพื่อใช้ปรับปรุง และพัฒนาทั้งระบบ และกระบวนการผลิตตลอดจนผลิตภัณฑ์ และเศษเหลือทิ้งที่ได้ให้เกิดประสิทธิภาพ และไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม

4. กระบวนการถลุงซิลิกา (ควอทซ์)

ก่อนที่จะนำแร่ควอทซ์ หรือ ซิลิกาเข้าสู่ขั้นตอนการถลุง เราจำเป็นต้องนำแร่ควอทซ์ที่ขุดขึ้นมาได้จากเหมือง ผ่านเข้ากระบวนการแต่งแร่เพื่อให้แร่ควอทซ์ที่นำมานั้นมีความบริสุทธิ์มากพอสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการถลุงให้ได้ซิลิคอนบริสุทธิ์ เนื่องจากโดยปกตินั้นแร่ควอทซ์จะมี เหล็ก แคลเซียม ไทเทเนียม โซเดียม ฟอสฟอรัส และโบรอน เป็นส่วนผสมอยู่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดธาตุปนเปื้อนดังกล่าว ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่กระบวนการต่อไปเนื่องจากในขั้นตอนการถลุงนั้น สารเจือปนเหล่านี้ ไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้ และอาจก่อให้เกิดปัญหา การแต่งแร่จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนบางส่วนออกไป เพื่อเตรียมวัตถุดิบก่อนนำเข้าสู่กรรมวิธีถลุงทางโลหกรรม ในเตาหลอมไฟฟ้าที่ให้ความร้อนอุณหภูมิสูงถึง 1,500 – 2,000 องศาเซลเซียส โดยการปล่อยกระแสไฟผ่านขั้วอิเลคโทรด (ซึ่งทำจากแท่งคาร์บอน) มีถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง (เนื่องจากเป็นที่ยอมรับกันว่าถ่านไม้มีความสะอาด และช่วยลดการเกิดรูพรุนของซิลิคอนที่ได้จากการถลุง เนื่องจากถ่านไม้เป็นตัวจับออกซิเจนที่ดี) จากนั้นเติม flux เพื่อช่วยในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ และเมื่อได้ซิลิคอนเกรดโลหกรรมแล้ว จึงนำไปทำให้บริสุทธิ์ต่อไป ด้วยการทำปฏิกิริยากับ HCl เกิดเป็น Trichlorosilane สำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ ในอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องใช้ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.9999 ทั้งนี้ ขั้นตอนและวิธีการทำให้ซิลิคอนบริสุทธิ์จะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ที่ใช้



ภาพที่ 3 แสดงขั้นตอน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ของการถลุงซิลิกา

(ที่มา http://www.sumcosi.com/english/laboratory/laboratory1.html)

ขั้นตอนการนำแร่ควอทซ์มาเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตซิลิคอน

1) การขุดสายแร่ควอทซ์จากเหมืองในระบบเปิดมาทำการบดให้มีขนาดเล็กลง โดยใช้เครื่องมือประเภท Jaw Crusher เพื่อช่วยในการบดหยาบ และลดขนาดของแร่วัตถุดิบให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปถลุงให้ได้เป็นซิลิคอนเกรดโลหกรรม (แร่ซิลิกาเกรดความบริสุทธิ์สูงมักพบแทรกตัวอยู่ภายใต้ชั้นเปลือกโลกที่ระดับความลึกลงหลายเมตร โดยเฉพาะซิลิกาในรูปก้อน : lump form จะได้มาจากสายแร่ควอทซ์เป็นส่วนใหญ่)

2) แร่ที่ได้หลังจากทำการบดลดขนาดแล้ว จะถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่เพื่อให้ซิลิกา (Quartz) มีความบริสุทธิ์เพียงพอสำหรับการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตซิลิคอนบริสุทธิ์ต่อไป ด้วยวิธีการล้าง และคัดขนาดด้วยตะแกรง (screening) หรือ Jig จากนั้นจึงนำมาแยกสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ออกโดยอาศัยกรรมวิธีทางเคมี และล้างทำความสะอาดด้วยกรดเกลือที่ให้ความร้อน (hot HCl) หรืออาจจำเป็นต้องใช้กรดที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เช่น กรดกัดแก้ว ร่วมกับการให้ความร้อน ซึ่งในขั้นตอนดังกล่าวนี้ จะทำให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ในที่นี้ ขนาด และความบริสุทธิ์ที่เหมาะสมของควอทซ์แต่ละชนิดที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในเตาถลุงจะพิจารณาจากผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ หรือประโยชน์ของการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต้นน้ำแต่ละประเภท รวมถึงสิ่งปนเปื้อนที่อาจหมายถึงแร่โลหะซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ในแร่ควอทซ์เกรดต่าง ๆ ว่ามีความจำเป็นต้องกำจัดออกด้วยหรือไม่)

3) นำแร่ควอทซ์ หรือ ซิลิกาที่ผ่านการคัดแยกจากกระบวนการแต่งแร่ (ในที่นี้จะต้องมีขนาด และคุณสมบัติขั้นต้น คือ เป็นซิลิกาชนิด Coarse silica (lump silica) และมีส่วนประกอบทางเคมีดังกล่าวไว้ในตารางที่ 1) จากนั้นจึงป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เตาถลุง หลอมด้วยความร้อน เพื่อแยกซิลิคอนออกจากสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งในขั้นตอนดังกล่าว แร่ควอทซ์ หรือซิลิกา

ถูกป้อนเข้าเตาหลอมไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) โดยให้กระแสไฟฟ้าผ่านไปยังอิเล็กโทรดที่ทำจากแท่งคาร์บอน มีถ่านไม้ (charcoal) เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ แหล่งคาร์บอนที่ใส่ให้กับปฏิกิริยาอาจได้มาจากถ่านโค้ก ถ่านหิน หรือเศษไม้ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 2,000 องศาเซลเซียส จากนั้น เติม flux เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในขั้นตอนนี้ จะได้ตะกรัน (slag) ประเภทซิลิเกต เหล็ก อะลูมิเนียม และโบรอน แยกออกมา เรียกขั้นตอนนี้ว่า Carbothermic Reduction ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการลดออกซิเจนที่ประกอบรวมอยู่ในอะตอมของแร่ควอทซ์ หรือซิลิกา ด้วยคาร์บอนจากถ่านไม้ โดยอาศัยพลังงานจากกระแสไฟฟ้า ทำปฏิกิริยาภายในเตาถลุงขนาดใหญ่ และมีแท่งอิเล็กโทรดซึ่งทำจากแกร์ไฟต์ขนาดใหญ่อีกจำนวน 3 แท่ง ซึ่งรองรับกระแสไฟฟ้าขนาด 10 แอมแปร์

ภาพที่ 4 ขั้นตอนการถลุงซิลิกา

$$SiO_2 + 2C \quad \text{-->} \quad 2Si + 2CO$$

แร่ควอทซ์ หรือซิลิกา จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในสถานะของเหลว และแยกตัวจากสารเจือปนด้วย flux ซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการถลุงนี้ จะถูกนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการล้างด้วยกรดและน้ำสะอาดต่อไป

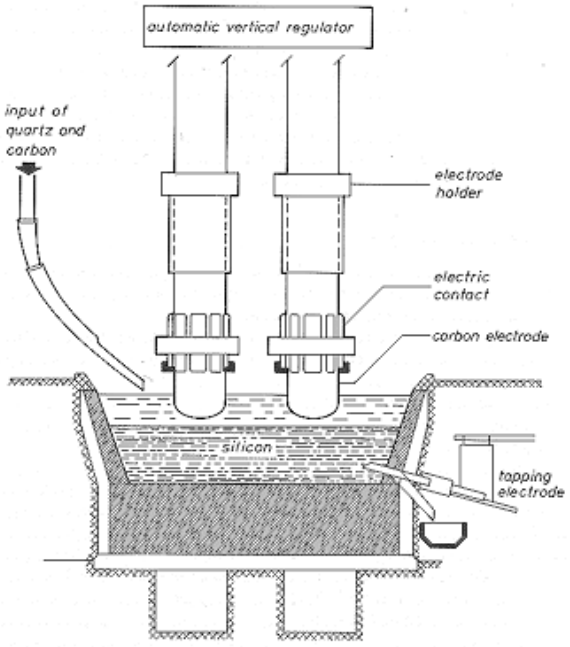
ในระหว่างขั้นตอนนี้ อาจเกิด SiO (g) ซึ่งเป็นสารพิษอันตราย จึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณการเกิด โดยสามารถทำได้ด้วยการเติมคาร์บอนดึงอะตอมออกซิเจนออก เหลือเพียงซิลิคอน นอกจากนี้ อาจมี SiO (g) ส่วนหนึ่งที่หลุดลอดออกจากเตาถลุง และรวมตัวกับอากาศภายนอกเกิดเป็น SiO_2 ในรูปฝุ่นละเอียด หรือที่เรียกว่า fume silica ซึ่งมีผลกระทบต่อสุขภาพของคนงานหากสูดหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดโรคซิลิโคซิส ที่เป็นอันตรายต่อปอด และ สาร SiC ที่อาจเกิดขึ้นได้เล็กน้อย ซึ่งมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ (ซิลิคอน) ที่ได้ลดลง อีกทั้ง อาจก่อให้เกิดการอุดตันภายในเตาหลอมไฟฟ้า เพราะ SiC ที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา ไม่อยู่ในสถานะของเหลว

แต่เป็นของแข็งจึงอาจไปอุดตันระบบการทำงานภายในของเตาหลอมได้ ปฏิกิริยาการเกิด SiC เป็นดังนี้

$$Si + C \quad \text{-->} \quad SiC$$

ทั้งนี้ สามารถแก้ไขด้วยการเติมส่วนผสมพิเศษบางอย่าง หรืออาจแก้ได้ด้วยปฏิกิริยาจากสารตั้งต้นของตัวมันเอง นั่นคือ ปริมาณแร่ควอทซ์ที่มากเกินพอ

$$2SiC + SiO_2 \quad \text{-->} \quad 2Si + 2CO$$



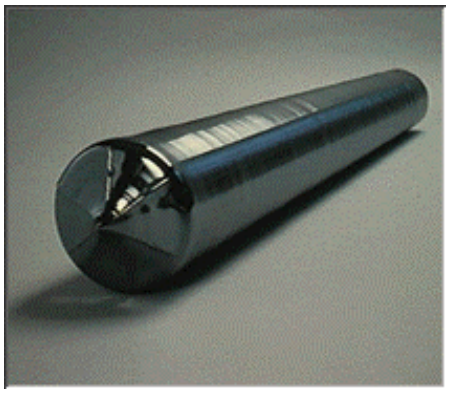
ภาพที่ 5 แสดงภายในเตาถลุง

(ที่มา http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_5/backbone/r5_1_1.html)

4) ซิลิคอน (Si) ที่ได้ในขั้นตอนนี้ จะถูกนำมาหล่อเป็นแท่ง (ingot) เพื่อใช้สำหรับการผลิตซิลิคอนเกรดที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นต่อไป หรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมโลหการเป็นหลัก ดังนั้น จึงมีชื่อเรียกซิลิคอนที่ได้นี้ว่า ซิลิคอนเกรดโลหกรรม (SiMG) ซึ่งหลังผ่านการหลอมซ้ำเพื่อลดปริมาณอะลูมิเนียม และแคลเซียมที่ปนอยู่ออกแล้ว จะมีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 99.6 ซึ่งนับว่ายังคงมีสารอื่นปนเปื้อนอยู่มาก จำเป็นต้องนำมาผ่านการทำให้บริสุทธิ์ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต (โดยผลผลิตที่ได้คิดเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณวัตถุดิบป้อน) จากนั้นจึงเทน้ำโลหะลงสู่แบบพิมพ์ เพื่อหล่อเป็นแท่ง (ingot) สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบประเภทสารเพิ่มประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมเหล็ก และเหล็กกล้า ใช้ผสมให้เกิดความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ (ราคาโดยประมาณเท่ากับ 0.5 เหรียญดอลล่าร์สหรัฐต่อกรัม) จากนั้น จึงนำซิลิคอนที่ได้ไปทำให้มี

ความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ตามคุณภาพของวัตถุดิบ โดยกระบวนการที่เรียกว่า Siemens Process ขั้นตอนนี้ มีด้วยกัน 2 วิธี ที่ได้รับความนิยมใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีขั้นตอน และสารตั้งต้นที่ต่างกันไป

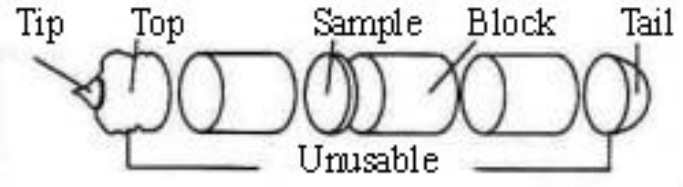
สำหรับซิลิคอนเกรดสารกึ่งตัวนำ (SiEG) นั้น ต้องการความบริสุทธิ์ที่สูงมากยิ่งขึ้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการทางฟิสิกส์ และเคมี ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป



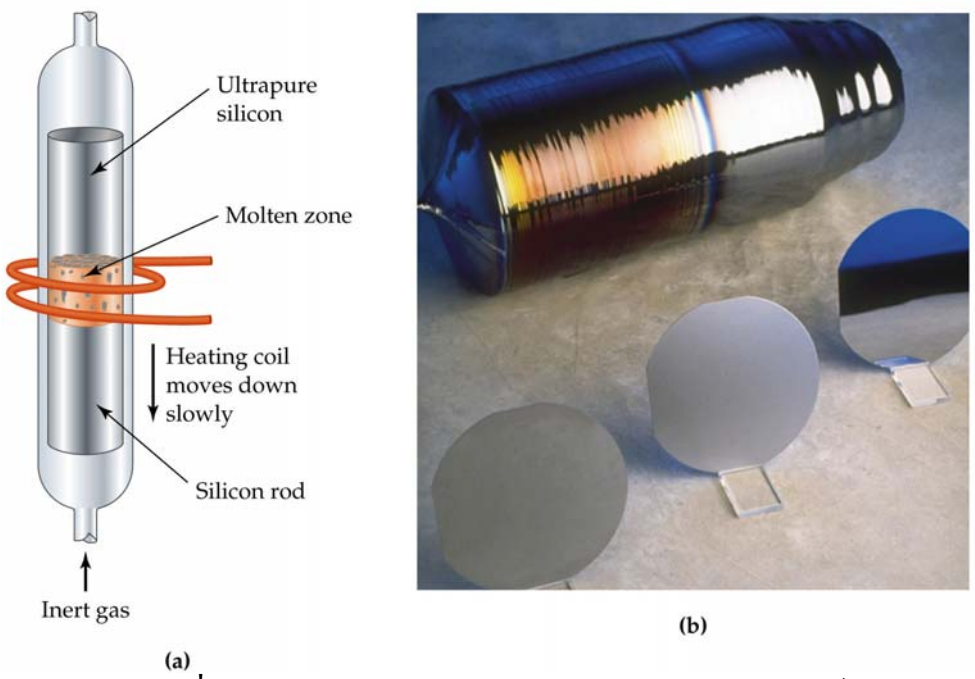
ภาพที่ 6 แท่งซิลิคอนเกรดโลหะ (Metallurgy Silicon Grade : SiMG)
(ที่มา http://www.dtic.mil/dpatitle3/hpfzs.htm)

วิธีทางฟิสิกส์

เป็นที่ทราบกันว่า การนำแท่งซิลิคอนที่ได้จากการหล่อหลังผ่านกระบวนการถลุง มาทำการหลอมซ้ำ และทิ้งให้เย็นเพื่อให้ซิลิคอนมีสถานะของแข็งอีกครั้งหนึ่ง เป็นการดึงเอาสารปนเปื้อนให้แยกออกจากซิลิคอนบริสุทธิ์ โดยสารปนเปื้อนดังกล่าวจะรวมตัวอยู่ที่ปลายสุดด้านหนึ่งของแท่ง ทำให้สามารถตัดส่วนปลายนั้นทิ้งไปได้ อีกวิธีหนึ่ง คือ การนำ SiMG มาบดเป็นผงละเอียด และล้างด้วยกรดเพื่อแยกเอาสิ่งปนเปื้อนออกไป ทำให้ได้ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น หรืออาจทำได้โดยการนำซิลิคอนที่ได้มาหลอมที่อุณหภูมิสูงเพื่อดึงเอาโลหะตัวอื่นๆ ที่เหลือปนอยู่ออกไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้ มีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น กรรมวิธีดังกล่าวได้รับความนิยมอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมโดยทั่วไป



ภาพที่ 7 แสดงส่วนของแท่งซิลิคอนที่นำมาใช้ในการผลิตเกรดสารกึ่งตัวนำ
(ที่มา http://www.mmtec.co.jp/mmtec_HP(e)/SENTAN/sentan5.html)



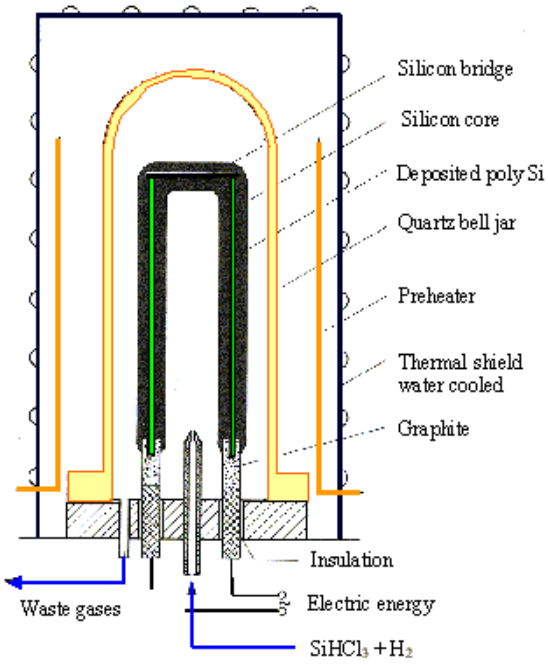
ภาพที่ 8 แสดงการนำ SiMG มาผ่านกระบวนการทางฟิสิกส์
เพื่อให้ได้ซิลิคอนเกรดสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น
(ที่มา http://wps.prenhall.com/wps/media/objects/602/616516/Media_Assets/Chapter19/Text_Images/FG19_04a.JPG)

วิธีทางเคมี

คือ การนำ SiMG (polycrystalline) ที่ได้มาบดเป็นผง และเข้าสู่กระบวนการโดยเปลี่ยนซิลิคอนที่ได้เป็นสารประกอบซิลิคอนประเภท Trichlorosilane (เป็นสารประเภท intermediate) โดยใช้ hydrochloride จากนั้นจึงค่อยเปลี่ยนสารประกอบดังกล่าว กลับมาเป็นซิลิคอนบริสุทธิ์อีกครั้ง ด้วยกรรมวิธีการกลั่นลำดับส่วน โดยกรรมวิธีนี้ มีชื่อเรียกว่า Siemens Process ในกระบวนการ (ในขั้นตอนนี้ ผลผลิตที่ได้คิดเป็นร้อยละ 98 ของปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ) โดยมีขั้นตอนนี้ ดังนี้

1) $Si + 3HCl \longrightarrow SiHCl_3$ (Trichlorosilane) $+ H_2$

2) $2SiHCl_3 \longrightarrow Si + 2HCl + SiCl_4$



ภาพที่ 9 กระบวนการทำ polycrystalline silicon

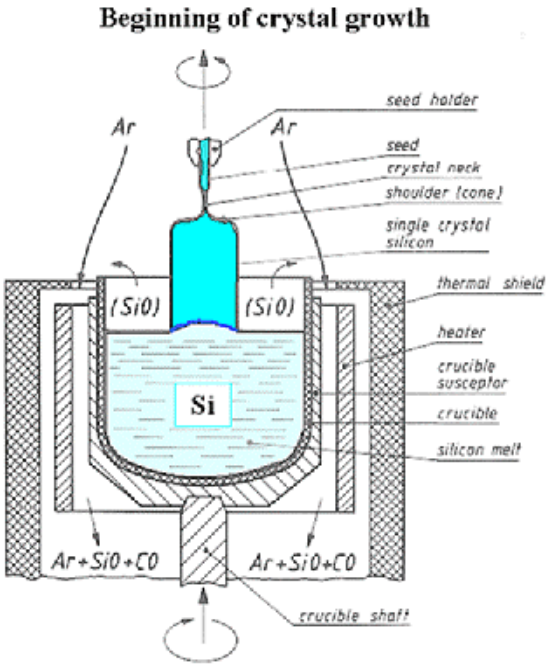
(ที่มา http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_5/backbone/r5_1_1.html)

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การนำ polycrystalline silicon ที่ได้จาก Siemens Process มาทำให้บริสุทธิ์มากขึ้น ด้วยกรรมวิธีของ DuPont โดยนำมาผสมกับแฮไลด์ ให้ได้เป็น $SiCl_4$ จากนั้น จึงนำ $SiCl_4$ มาผสมกับสังกะสีเพื่อแยกซิลิคอนบริสุทธิ์ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้สำหรับผลิตสารกึ่งตัวนำ

3) $Si + 2Cl_2 \longrightarrow SiCl_4$ (Silicon tetrachloride)

$SiCl_4 + 2Zn \longrightarrow Si + 2ZnCl_4$

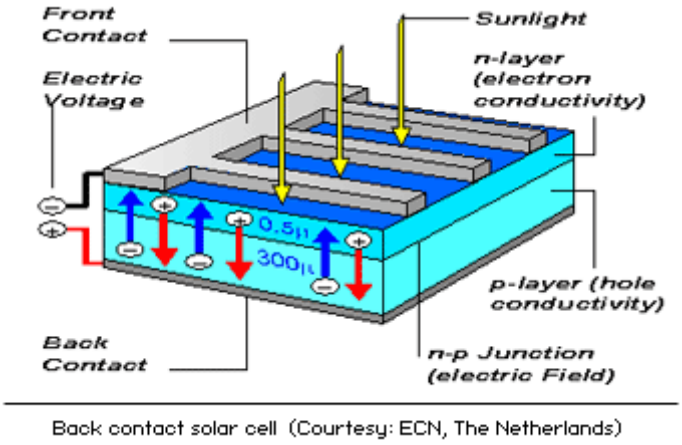
เมื่อได้ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์มากพอสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ประเภทสารกึ่งตัวนำ ในแผงวงจรไฟฟ้าต่างๆ จากนั้น จึงนำซิลิคอนที่ได้นี้ไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการปลูกถ่ายผลึกซิลิคอนเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไปด้วย Czochralski Process



ภาพที่ 10 แสดงขั้นตอนการผลิตซิลิคอน (Solar Cell Grade)

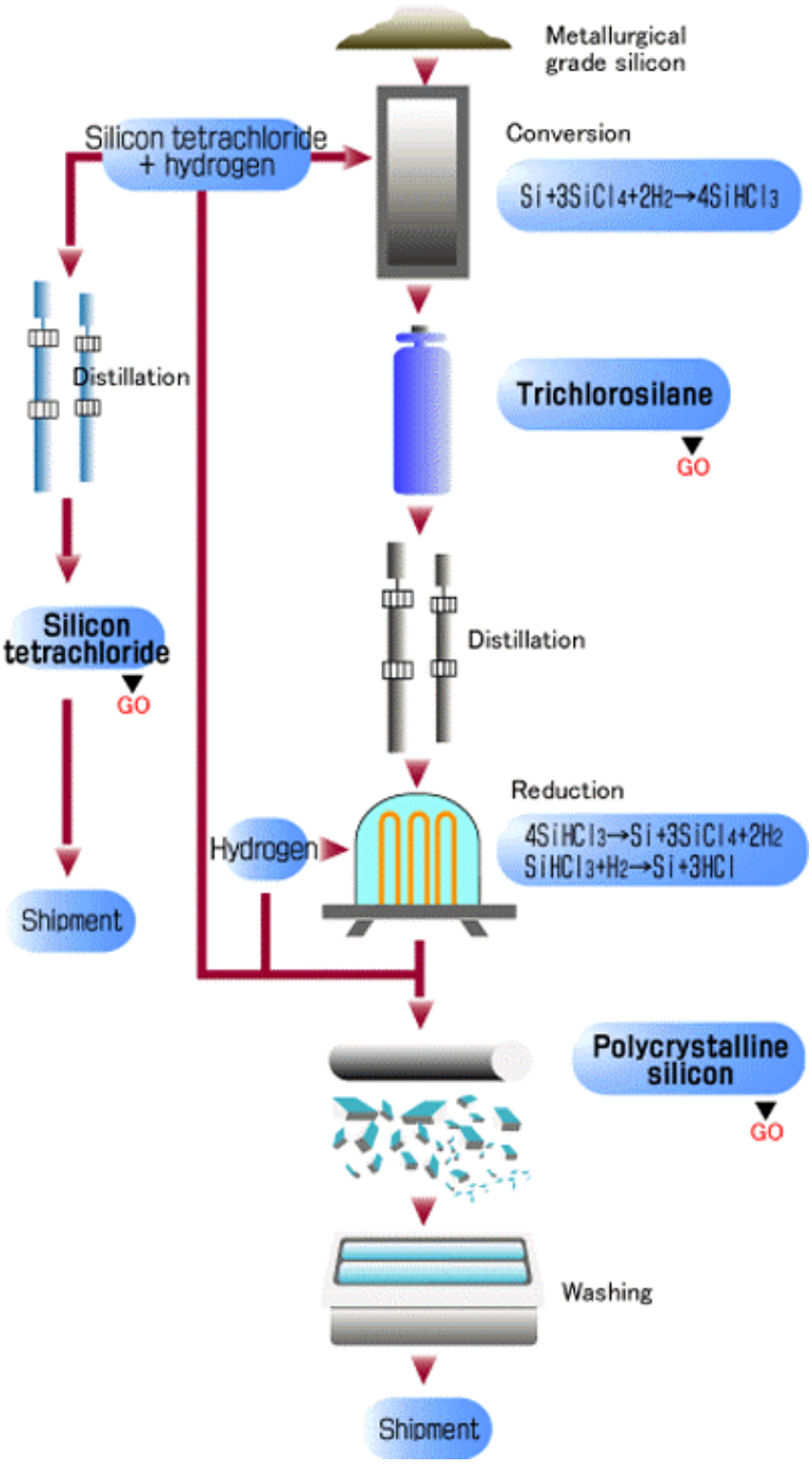
ด้วย Czochralski Process

(ที่มา http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_5/backbone/r5_1_2.html)



ภาพที่ 11 แสดงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

(ที่มา http://europa.eu.int/comm/research/energy/images/solar_cell.gif)



ภาพที่ 12 แสดงขั้นตอนการผลิตซิลิคอนบริสุทธิ์เกรดสารกึ่งตัวนำ โดยมีวัตถุดิบตั้งต้นเป็นซิลิคอนเกรดโลหกรรม

(ที่มา http://www.sumitomo-ti.co.jp/silicon_e/silicon.html)

5. ปริมาณวัตถุดิบตั้งต้น และเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิต

จากข้อมูลการศึกษาของ G.J.M. Phylipsen และ E.A. Alsema เกี่ยวกับ Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules พบว่าการนำแร่ควอทซ์ หรือ ซิลิกา มาใช้เพื่อผลิตให้ได้เป็นซิลิคอนเกรดโลหกรรม ต้องใช้แร่ควอทซ์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ปริมาณ 2.8-2.9 กิโลกรัม สำหรับพลังงานที่ต้องใช้ในขั้นตอนนี้ เฉลี่ยแล้วเป็นเพียงร้อยละ 3 ของขั้นตอนการถลุง (ทั้งนี้ ขึ้นกับระยะทางในการขนส่งระหว่างเหมือง และโรงแต่งแร่) นั่นคือ ความต้องการพลังงานน้อยกว่า 0.2 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อการผลิตซิลิคอนเกรดโลหกรรม 1 กิโลกรัม โดยในขั้นตอนนี้ จะมีฝุ่นละอองของซิลิกาที่เกิดจากการบดคัดขนาด และกระบวนการแต่งแร่ ระบายออกสู่บรรยากาศร้อยละ 17

กระบวนการถลุง

ในขั้นตอนนี้ วัตถุดิบ (แร่ควอทซ์) ที่ป้อนเข้าไปจะให้ผลผลิตกลับมาร้อยละ 80 สำหรับความต้องการด้านพลังงานของกระบวนการนี้ มีมากถึง 51.34 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อการผลิตซิลิคอนเกรดโลหกรรม 1 กิโลกรัม ซึ่งแบ่งได้เป็นพลังงานที่ใช้ในกระบวนการหลัก 13 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อการผลิตซิลิคอนเกรดโลหกรรม 1 กิโลกรัม และพลังงานส่วนเสริมสำหรับโรงงานด้านแสงสว่างและความร้อน อีก 0.89 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อการผลิตซิลิคอนเกรดโลหกรรม 1 กิโลกรัม โดยมีก๊าซต่าง ๆ เช่น CO, SiO, CH_4, CO_2, H_2O SiO_2 และ NO_x ปล่อยออกมาจากกระบวนการ โดยสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับ CO_2, H_2O SiO_2 ตามลำดับ ส่วนตะกรันที่เกิดขึ้นในสถานะของแข็งที่ยังคงมีจำนวนซิลิคอนเหลืออยู่จะถูกนำไปขายเป็นผลผลิตพลอยได้ ทั้งนี้ ในระบบจัดการสิ่งแวดล้อมจะมีตัวกรองฝุ่นซิลิกาที่มีขนาดเล็กร้อยละ 96.5 และออกไซด์ของโลหะร้อยละ 1.5 เป็นของเสีย

ปริมาณความต้องการด้านพลังงานของการผลิตซิลิคอนเกรดสารกึ่งตัวนำเท่ากับ 40 – 50 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม โดยคิดปริมาณผลผลิตที่ได้เป็นร้อยละ 70-89

ภาพที่ 13 ถ่านไม้

(ที่มา http://www.thegrillstoreandmore.com/image/products/big-pics/hardwood-charcoal.jpg)

กระบวนการทำซิลิคอนให้บริสุทธิ์

ในกระบวนการนี้ นิยมใช้กรรมวิธี Siemens Process ซึ่งต้องใช้กรด HCl เพื่อเปลี่ยนซิลิคอนเกรดโลหกรรม (SiMG) ให้เป็นสารประกอบซิลิคอน (สารตัวกลาง) ก่อนที่จะผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อให้ได้เป็นซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9999) ในเกรดของสารกึ่งตัวนำ (เกรดอิเล็กทรอนิกส์ : SiEG) ต่อไป แต่เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายสูง และผลผลิตที่ได้ต่อปริมาณวัตถุดิบป้อนค่อนข้างน้อย ในวงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จึงมักนิยมใช้ scrap electronics มารีไซเคิลเพื่อนำกลับมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่า ในช่วงปลายของศตวรรษที่ 70 (1970s) พบว่าการทำซิลิคอนให้บริสุทธิ์ (เกรดสารกึ่งตัวนำ) สำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ส่วนใหญ่ใช้เทคโนโลยี fluidized bed ซึ่งพัฒนาโดย Union Carbide Corporation (UCC) ความต้องการพลังงานในกระบวนการดังกล่าวนี้ อาจกล่าวได้ว่ามีปริมาณสูงที่สุดนั่นคือ 110 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อการผลิตซิลิคอนเกรดอิเล็กทรอนิกส์ 1 กิโลกรัม ที่ประสิทธิภาพการผลิตร้อยละ 85 [Breneman, W.C., E.G. Farrier and H. Morihara, Preliminary process design and economics of low cost solar grade silicon production, in: 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, 1978, p.339] ซึ่งในกระบวนการดังกล่าว จะมีสารประเภท $CaCl_2$ และ SiO_2 ถูกปล่อยออกมา ซึ่งเป็นสารที่ไม่ส่งผลกระทบใด ๆ ต่อมนุษย์

ตารางที่ 2 ปริมาณวัตถุดิบ และเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการผลิตซิลิคอนบริสุทธิ์จากแร่ควอทซ์ (ซิลิกา : SiO_2)

กระบวนการ/วัตถุดิบ	หน่วย *	กรณีต่ำกว่าการประเมิน	กรณีพื้นฐาน	ค่าใช้จ่าย (บ./กก.) **
การทำเหมือง และการทำแร่ควอทซ์ให้บริสุทธิ์				
- แร่ควอทซ์ (SiO_2)	kg/kg SiMG	2.85	2.85	1.3
กระบวนการลดออกซิเจนเพื่อผลิตซิลิคอนเกรดโลหกรรม				
- ถ่านไม้	kg/kg SiMG	0.40	0.37	2.14
- ถ่านหิน	kg/kg SiMG	0.60	0.56	0.88
- ถ่านโค้ก	kg/kg SiMG	0.40	0.37	6.25
- เศษไม้	kg/kg SiMG	1.40	1.32	
กระบวนการผลิตซิลิคอนความบริสุทธิ์สูง				
- ซิลิคอนเกรดโลหกรรม (SiMG)	kg/kg SiEG	1.04	1.02	60-80
- Silane Tetrachloride	kg/kg SiEG	0.15	0.07	
ผลผลิตที่ได้เป็นซิลิคอนเกรดสารกึ่งตัวนำ (Process Yield)			**ร้อยละ 80 - 85**	

หมายเหตุ 1. หน่วย *

- kg/kg SiMG (กิโลกรัม/กิโลกรัมของซิลิคอนเกรดโลหกรรม)
- kg/kg SiEG (กิโลกรัม/กิโลกรัมของซิลิคอนเกรดสารกึ่งตัวนำ)

2. ค่าใช้จ่าย (บาท/กก.) ** ประมาณจากราคาที่สืบค้นได้จากเว็ปไซต์การนำเข้าส่งออกของกรมศุลกากร (http://www.customs.go.th/Statistic/StatisticIndex.jsp)

6. กรณีศึกษากระบวนการผลิตโลหะซิลิคอน (Silicon Metal) ในระบบปิด

อุตสาหกรรมการผลิตซิลิคอน

อุตสาหกรรมการผลิตซิลิคอน มีขั้นตอนกรรมวิธีคล้ายกับอุตสาหกรรมการผลิตโลหะโดยทั่วไป

จากข้อมูลเอกสารทางวิชาการของ College of Engineers and Minerals Resources หัวข้อ Production of Industrial Grade Silicon รายงานว่าปี 1995 โลกตะวันตกมีความต้องการซิลิคอนมากถึง 790,000 เมตริกตัน โดยคิดเป็นการเติบโตที่อัตราเฉลี่ยถึงร้อยละ 5 กระทั่งถึงศตวรรษที่ 21 ดังนั้น จึงทำการศึกษากระบวนการผลิตโลหะซิลิคอนในระบบปิด เพื่อควบคุมผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม และนำกลับของเสียที่เกิดขึ้นในระบบกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อกระบวนการผลิต

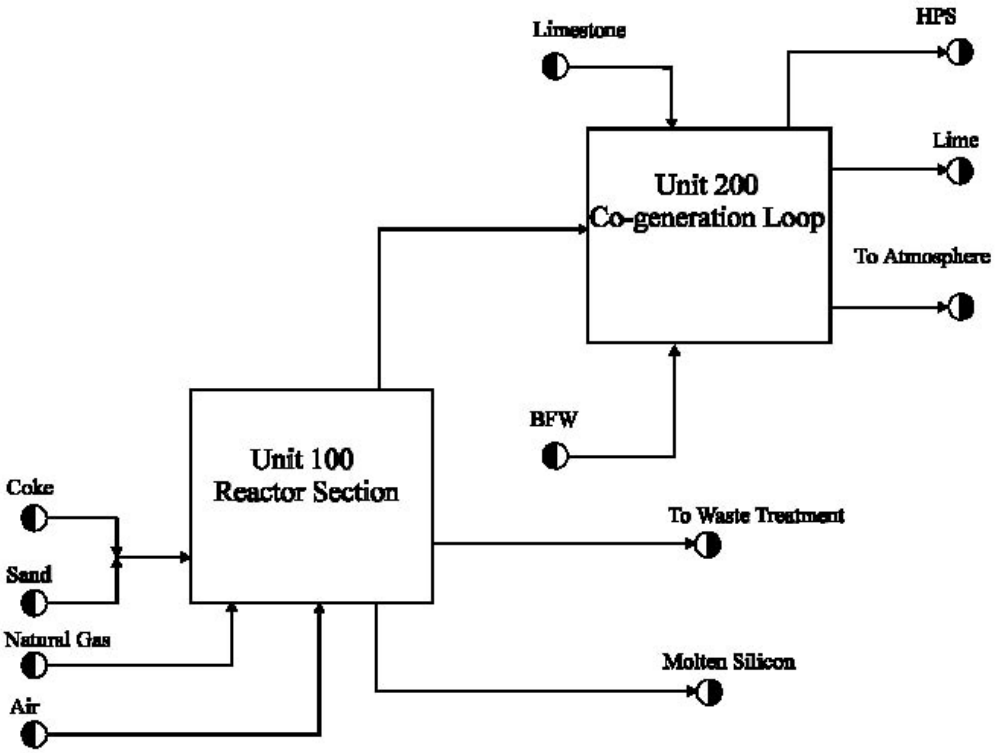


Figure 1: BFD for Production of Industrial Grade Silicon

ภาพที่ 14 แสดงภาพรวมของกระบวนการผลิตโลหะซิลิคอนในระบบปิด

(ที่มา http://www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/large_proj/silicon.PDF)

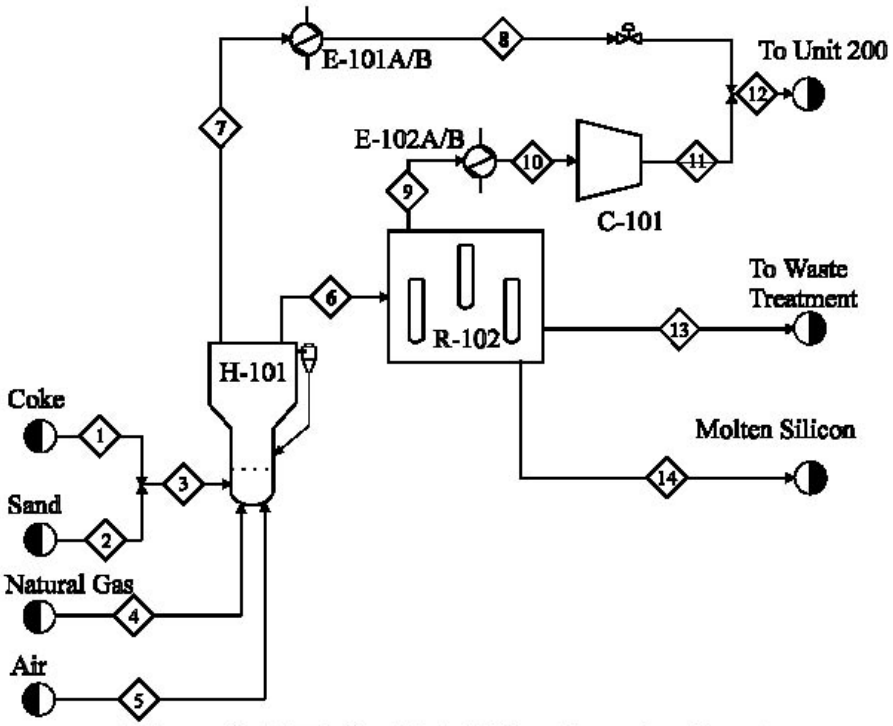


Figure 2: PFD for Unit 100 -- Reaction Section

ภาพที่ 15 แสดงขั้นตอนการถลุงซิลิกา และผลผลิตที่เกิดขึ้น

(ที่มา http://www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/large_proj/silicon.PDF)

จากภาพเป็นการแสดงระบบ และขั้นตอนการเดินทางของวัตถุดิบ และกระบวนการในระบบถลุงซิลิคอน และการกำจัดตะกรัน รวมทั้งก๊าซเสียที่เกิดขึ้นในระบบ โดยเริ่มจากการนำวัตถุดิบได้แก่ ถ่านโค้ก (หรือถ่านไม้) และซิลิกา (SiO_2) ป้อนเข้าสู่ถังผสม และส่งเข้าสู่ Fluidized Bed Preheater (H-101) โดยให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 1,500 องศาเซลเซียส (ความร้อนที่ให้กับกระบวนการเกิดจากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ รวมกับอากาศที่ใส่เข้าไปบริเวณท่อด้านล่างของเตา) ณ อุณหภูมินี้ SiO_2 และคาร์บอน (จากถ่าน) จะยังคงไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ ขึ้น มีเพียงก๊าซร้อนที่ออกมาจาก Fluidized Bed Preheater ซึ่งจะถูกแยก และส่งไปยัง Thermal Regenerator เพื่อทำการปรับอุณหภูมิ ตามเส้นทางหมายเลข 7 สำหรับวัตถุดิบที่ถูกให้ความร้อน (heated solid) นั้น จะเข้าสู่เส้นทางหมายเลข 6 เพื่อไปยัง reduction furnace ซึ่งเป็นเตาถลุงไฟฟ้าประกอบด้วยแท่งอิเล็กโทรด ที่ทำจากกราไฟต์ จำนวน 3 แท่ง อุณหภูมิเตาประมาณ 2,045 องศาเซลเซียส ให้พลังงานไฟฟ้า และมีผลผลิตคิดเป็นร้อยละ 90 ของวัตถุดิบที่ป้อน เนื่องจากแท่งอิโทรดกราไฟต์จะสูญเสียไปในปฏิกิริยาการแทนที่ระหว่างซิลิกา และคาร์บอน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำโลหะสถานะหลอมเหลวซึ่งมีส่วนผสมของโลหะซิลิคอน และสารปนเปื้อนต่างๆ ที่ต้องนำไปผ่านระบบการทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งหนึ่งตามเส้นทางหมายเลข 14

โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแทนที่ ดังสมการ

$2SiO_2$ (l) + 4C (s) --> SiO (g) + SiC + 3CO (g)

SiO (g) + SiC (s) --> 2Si (l) + CO (g)

SiO_2 (l) + S (s) --> SO_2 (g) + Si (l)

ส่วนซิลิกา และคาร์บอนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจะถูกส่งไปกำจัดยัง Waste Treatment (เส้นทางหมายเลข 13) และสำหรับแก๊สที่เกิดจากกระบวนการถลุงซิลิกานี้ จะถูกส่งไปยัง Thermal Regenerator เพื่อปรับอุณหภูมิ โดยจะถูกนำไปรวมกับแก๊สที่ได้จาก Preheater ในช่วงแรก ก่อนที่จะทำการเพิ่มความดัน (ใน unit 200) และอัดกลับเข้าไปเพื่อใช้เป็นพลังงานให้กับเตาถลุง (reduction furnace)

ใน unit 200 ซึ่งจะเป็นระบบ generate gas & fume นั้น แก๊สที่ถูกปรับอุณหภูมิแล้วจาก unit 100 จะถูกส่งเข้ามายัง steam boiler เพื่อทำการเพิ่มแรงดัน โดยมี boiler จากด้านล่างของระบบทำการส่งน้ำขึ้นมายัง steam boiler ด้วยแรงดัน 40.8 MPa เพื่อผลิตเป็นไอน้ำที่มีแรงดันจากแก๊สใน unit 100 ช่วยเสริม ก่อนส่งไปยัง Turbine เพื่อให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าส่งกลับไปยังเตาถลุงไฟฟ้าของ unit 100 ต่อไป ส่วนแก๊สที่เหลือจากระบบจะถูกส่งไปกำจัดยัง Fluidized Bed (H-102) โดยแก๊สเสียที่เกิดขึ้นนั้น จะถูกส่งมาจะเข้าสู่ด้านล่างของระบบและไหลผ่านขึ้นไปยังด้านบนซึ่งมีหินปูนบดเป็นผงละเอียด $CaCO_3$ เป็นสารที่ทำหน้าที่ดัก และกำจัดแก๊สที่ถูกส่งมา เกิดปฏิกิริยาระหว่าง $CaCO_3$ และ SO_2 ได้เป็นตะกอน $CaSO_4.2H_2O$ (หรือยิปซัม) สามารถนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเซรามิกได้ต่อไป เนื่องจากแก๊สที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการแทนที่นี้ ส่วนใหญ่เป็นแก๊ส SO_2 ที่เป็นอันตรายทั้งต่อระบบนิเวศ และสิ่งมีชีวิตโดยทั่วไป จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการกำจัดก่อนปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งในที่นี้ ตามมาตรการป้องกันระบบสิ่งแวดล้อมกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับ SO_2 ในชั้นบรรยากาศให้มีปริมาณ ไม่เกิน 0.5 ppm

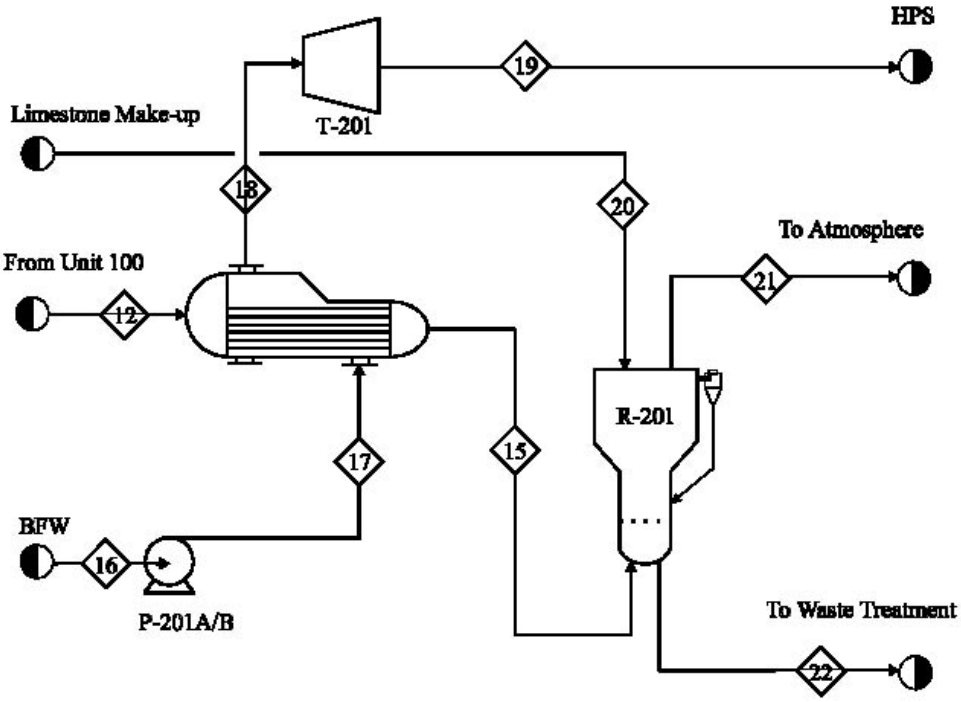


Figure 3: PFD for Unit 200 -- Cogeneration Loop

ภาพที่ 16 แสดงกระบวนการผลิตโลหะซิลิคอน รวมถึงของเสียที่เกิดจากกระบวนการ
(ที่มา http://www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/large_proj/silicon.PDF)

สำหรับ Unit 200 ก๊าซที่มาจากเส้นทางที่ 12 ของ Unit 100 จะถูกป้อนเข้าสู่ Steam Boiler (E-201) เพื่อให้พลังงานสำหรับให้กำเนิดไอน้ำแรงดันสูง ส่งไปตามเส้นทางหมายเลข 18 Steam Boiler จะส่งผ่านไอน้ำแรงดันสูงผ่านเส้นทางหมายเลข 16 ด้วยแรงส่งสูงถึง 40.8 Mpa เพื่อให้กำเนิดพลังงานในการผลิตไอน้ำแรงดันสูง และส่งไปที่ Turbine (T-201) สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานสำคัญให้กับกระบวนการใน Reduction Furnace (R-101)

นอกจากนั้นแล้ว ก๊าซที่ได้จาก Unit 100 : ซึ่งบรรจุหินปูนบดละเอียด ($CaCO_3$) จะถูกส่งกลับไปยัง fluidized bed เพื่อกำจัดซัลเฟอร์ในรูปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่เกิดขึ้น โดยจะเป็นตัวดูดซับ และเกิดปฏิกิริยาระหว่างซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับหินปูนได้เป็นแคลเซียมซัลเฟตตกตะกอนเป็นกากของเสีย ก่อนส่งไปยังเส้นทางหมายเลข 22 เพื่อเข้าสู่กระบวนการกำจัด และปล่อยสู่บรรยากาศต่อไป

หมายเหตุ

- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จะถูกกำจัดออกไป โดยมีปริมาณที่วัดได้ไม่เกิน 0.5 ppm.
- หินปูนที่ใช้เพื่อการลดปริมาณ SO_2 มีอัตราส่วนเป็น 2.5 : 1 และจากรายงานผลที่ได้พบว่าตรวจไม่พบก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแก๊สที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ
- หินปูน ที่ใส่ทางด้านบนของ fluidized bed เพื่อกำจัดก๊าซที่ออกมา ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการแทนที่ระหว่างหินปูน ($CaCO_3$) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้เป็นแคลเซียมซัลเฟตในรูปตะกอนที่นอนอยู่ด้านล่างเตา ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกได้ ตัวปฏิบัติการในระบบนี้ จะถูกนำกลับมาใช้หมุนเวียนใน 2 Unit (แบบคู่ขนาน)

7. การนำซิลิคอนบริสุทธิ์ไปใช้ประโยชน์

การใช้ประโยชน์ของซิลิคอนในอุตสาหกรรมต่างๆ นั้น แบ่งออกได้ตามชนิด และคุณสมบัติของซิลิคอนแต่ละประเภท ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยในภาพรวมสามารถแบ่งการใช้ประโยชน์ออกได้เป็น 4 ประเภทงานใหญ่ๆ นั่นคือ

1. การนำซิลิคอนไปใช้ในอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม เพื่อเป็นโลหะผสมสำหรับเพิ่มความแข็งแรง ทนทานให้กับเนื้อโลหะ สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ เครื่องจักร ฯ
2. การนำซิลิคอนไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเคมี และเวชภัณฑ์ เพื่อผลิตซิลิโคน และสารเคมีอื่นๆ สำหรับใช้ในทางการแพทย์ต่อไป นอกจากนี้ยังสามารถนำซิลิคอนไปใช้ในรูปของโลหะผสมคาร์ไบด์ ใช้เพื่อเป็นส่วนผสมป้องกันการผุกร่อน
3. การนำซิลิคอนไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยการนำซิลิคอนบริสุทธิ์มาผสมกับธาตุ โบรอน แกลเลียม ฟอสฟอรัส หรืออาเซนิก เพื่อผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า และเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการผลิตโสตทัศนูปกรณ์ อุตสาหกรรมผลิตเครื่องส่งสัญญาณ โดยการนำ
4. การนำโลหะซิลิคอนผสม ประเภท silicon ferroalloys ไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก และชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ โดยคัดเลือกจากคุณสมบัติด้านความแข็งแรงทนทาน

นอกเหนือจากประโยชน์ใน 4 กลุ่มข้างต้นแล้ว ไมโครซิลิกา (silica fume) ซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากขบวนการถลุงซิลิกามีส่วนประกอบของซิลิคอนประกอบอยู่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์ได้

8. ราคาโลหะซิลิคอนเกรดต่าง ๆ

ซิลิคอนที่ผลิตได้มีหลายเกรดด้วยกัน คือ

1) ซิลิคอนเกรดสำหรับผลิตแก้ว และกระจก
2) ซิลิคอนเกรดสำหรับอุตสาหกรรมโลหการ
3) ซิลิคอนเกรดสำหรับอุตสาหกรรมเคมี
4) ซิลิคอนเกรดสำหรับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์
5) ซิลิคอนเกรดสำหรับอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

จากข้อมูลการวิจัย ตามโครงการศึกษาความเป็นไปได้ของการจัดตั้งโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย ของ ดร.ดุสิต เครืองาม ได้เสนอรายละเอียดเกี่ยวกับต้นทุนการผลิตและดำเนินงาน ซึ่งประเมินโดยเริ่มจากวัตถุดิบ คือ ซิลิกา หรือ แร่ควอทซ์ จนกระทั่งผลิตได้เป็นซิลิคอนเกรดเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 3 แสดงราคาซิลิคอนตามคุณสมบัติ และการนำไปใช้

วัสดุ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)*
ซิลิกา หรือแร่ควอทซ์ที่ได้จากเหมือง	1.3
ซิลิคอนที่ได้จากการถลุง (เกรดโลหกรรม)	60 – 80
ซิลิคอนเกรดสารกึ่งตัวนำ	1,600 – 4,000
ผลึกซิลิคอน	หลายพันบาท
(ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์)	(คิดเป็น 120 บาทต่อประสิทธิภาพ
	การผลิตกำลังไฟฟ้า 1 วัตต์ : ณ ปี 2546)

หมายเหตุ * ราคา ณ ปี 2544

ที่มา : โชติ ตราชู. ควอตซ์ แร่เศรษฐกิจของไทยในยุคน้ำมันแพง. กรมทรัพยากรธรณี, 2544

9. สถานการณ์ทางการตลาดของโลหะซิลิคอน และเฟอโรซิลิคอน

จากการศึกษา และรวบรวมข้อมูลของปี 2001 พบว่าความต้องการโลหะซิลิคอนในซีกโลกตะวันตกมีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกปี ขณะที่ผู้บริโภคฝั่งประเทศแถบทวีปเอเชียต่างประสบปัญหาด้านเศรษฐกิจ ส่งผลให้ความต้องการในตลาดลดลงกว่าปี 2000 แต่จีนกลับกลายมาเป็นผู้นำการผลิตรายใหญ่ที่สุดของโลก ซึ่งมีปริมาณผลผลิตโลหะซิลิคอนกว่า 300,000 ตันต่อปี ทั้งนี้ Roskill คาดว่าความต้องการใช้โลหะซิลิคอนในอุตสาหกรรมผลิตอะลูมิเนียมผสม และเฟอโรซิลิคอน ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) จะมีเพิ่มขึ้นใกล้เคียงอัตราร้อยละ 4 ต่อปี และคาดว่าจะเติบโตช้าสุดในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อ และเหล็กคาร์บอน จากรายงานยังกล่าวอีกว่า จากการเพิ่มปริมาณการใช้โลหะผสม และเหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรม ส่งผลให้ซิลิคอนสามารถขยายตลาดบริโภคทั่วโลกได้ประมาณ 655 ตันในปี 2002

ปัจจุบันผู้ผลิต โลหะซิลิคอนรายใหญ่อันดับต้นของโลก ได้แก่ ประเทศจีน บราซิล ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา และนอร์เวย์ ในขณะที่ประเทศจีน เป็นผู้นำด้านการผลิตทั้งโลหะซิลิคอน และเฟอโรซิลิคอน (Ferrosilicon) มีกำลังการผลิตมากที่สุด (U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Jan 2004) รวมถึงมีโรงงานขนาดใหญ่ ที่สามารถผลิตโลหะซิลิคอนได้มากถึงกว่า 300,000 ตันต่อปี และกำลังเปิดตลาดการค้าด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจากการติดตามข้อมูลทางการตลาดของประเทศจีน พบว่า ปัจจุบันจีนเร่งนำเข้าแร่ และวัตถุดิบสำหรับการผลิตอุปกรณ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นแร่ดีบุก หรือแม้กระทั่งซิลิคอนบริสุทธิ์ (เกรดโลหกรรม) สำหรับแผนการพัฒนาประเทศในครั้งนี้

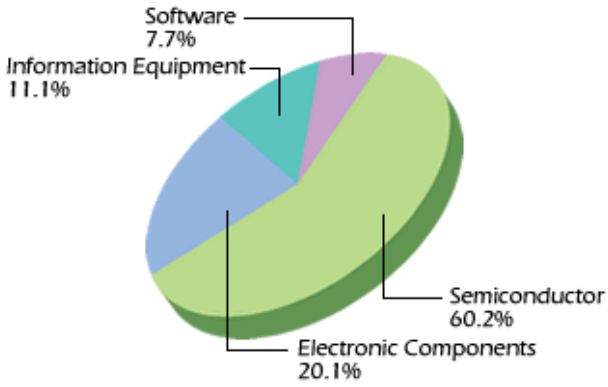
จากรายงานของ roskill (Silicon and Ferrosilicon. www.roskill.com/reports/silicon) ทำให้ทราบข้อมูลในเบื้องต้นว่า แม้การผลิตซิลิคอน และเฟอโรซิลิคอนจะมีส่วนเกี่ยวข้องกันอย่างมาก แต่ตลาดการจำหน่ายกลับมีทิศทางตรงกันข้าม ด้วยเหตุที่ ซิลิคอนถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียม เคมีภัณฑ์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งคาดว่าอัตราการเติบโตตามความต้องการของโลหะซิลิคอนจะสูงขึ้นประมาณร้อยละ 6 ต่อปีเป็นเวลาต่อเนื่องถึง 5 ปีข้างหน้า ขณะเดียวกันกับที่อุตสาหกรรมการผลิตซิลิโคน (silicone) ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ มีการเติบโตอย่างรวดเร็วด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันพบว่าอัตราความต้องการเฟอโรซิลิคอนซึ่งขึ้นกับภาวะความต้องการในอุตสาหกรรมการหล่อเหล็กยังคงหยุดนิ่งเป็นเวลาหลายปี แต่ความต้องการเฟอโรซิลิคอนในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กคาร์บอน (carbon steel) และเหล็กผสม มีอัตราการเติบโตต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามภาวะความต้องการของตลาดยังคงเท่ากับในอุตสาหกรรมหล่อเหล็ก ซึ่งคาดว่ามีไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.5 ต่อปี กระทั่งถึงปี 2007 ในขณะที่ความต้องการใช้เหล็กมีมากกว่าร้อยละ 2 จากผลการศึกษา มีการคาดการณ์ว่าประเทศในแถบเอเชีย จะเป็นก้าวขึ้นเป็นผู้นำด้านปริมาณความต้องการบริโภคซิลิคอนในอุตสาหกรรมผลิตโลหะผสมอะลูมิเนียม และเฟอโรซิลิคอนในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิม คาดว่าจะเพิ่มขึ้นใกล้เคียงร้อยละ 4 ต่อปี การเติบโตอย่างช้าที่สุด

คาดว่าอยู่ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อ และเหล็กคาร์บอน ทางด้านผู้ผลิต มีข้อมูลปี 2001 ซึ่งรายงานว่า ปริมาณการผลิตโลหะซิลิคอนของโลกเพิ่มขึ้นจาก 730 kt ในปี 1992 เป็น 1.2 Mt ในปี 2002 ผู้ผลิตหลัก ได้แก่ ประเทศจีน (จากกว่า 15 ประเทศทั่วโลก) มีการเพิ่มปริมาณการผลิตคิดเป็นร้อยละ 39 ของผลผลิตที่มีทั้งหมดของโลก (เทียบกับปริมาณการผลิตของประเทศต่างๆ : นอร์เวย์ ร้อยละ 12 สหรัฐอเมริกา ร้อยละ 11 บราซิล ร้อยละ 10 อื่นๆ ร้อยละ 28)

ส่วนข่าวการปิดกิจการ Lithgow ในประเทศออสเตรเลีย ช่วงเดือน มีนาคม 2003 ที่ผ่านมา เป็นเพียงแนวทางสำหรับการฟื้นฟูกิจการ และปรับปรุงโครงสร้างระบบการผลิตด้วยเตาหลอมขนาดใหญ่ของโรงงาน โดยบริษัท Nikopol ประเทศยูเครน ซึ่งคาดว่าจะเปิดดำเนินการในเดือนกันยายน 2003 รวมถึงการเพิ่มจำนวนเตาหลอมขนาด 25 kt ถึง 2 เตาของโรงงาน Iran Ferrosilice's Semnan ferrosilicon

นอกจากนี้ มีโครงการขนาดย่อมหลายโครงการในประเทศจีน ที่ดำเนินการวางแผนการผลิตเฟอโรซิลิคอน ซึ่งคิดเป็นปริมาณที่มากที่สุด สามารถผลิตได้ถึงประมาณ 20 kt ต่อปี ปัจจุบันอยู่ในระหว่างดำเนินการก่อสร้างใน Lanzhou Gaolin FerroAlloy ของมณฑล Gansu

สำหรับในส่วนของราคาโลหะซิลิคอน และเฟอโรซิลิคอน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากปัจจัยด้านเทคนิคหลายประการ เช่น มาตรการภาษีป้องกันการทุ่มตลาด รวมถึงความต้องการใช้วัตถุดิบในอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผู้ผลิตโลหะซิลิคอนลดกำลังการผลิตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลต่อราคาโลหะซิลิคอนให้ขยับตัวสูงขึ้นในปี 2003 อีกทั้ง มาตรการต่อต้านการทุ่มตลาดนำเข้าของรัสเซียในสหรัฐอเมริกา ปลายปี 2003 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ราคาโลหะซิลิคอนยังคงรักษาระดับอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ราคาของเฟอโรซิลิคอนลดต่ำลง โลหะซิลิคอนมีราคาเพิ่มสูงขึ้นถึง 0.64 ดอลล่าร์สหรัฐต่อปอนด์ (ประมาณ 59 บาท/กิโลกรัม) ในปี 2004 เฉพาะในสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ราคาส่งออกของจีน และยุโรปจะคงที่ แต่ราคาเฟอโรซิลิคอนจะลดลงในตลาดการค้าวัตถุดิบของจีน และสำหรับข้อมูลของปริมาณการบริโภคซิลิคอนในอุตสาหกรรมต่างๆ นั้น ค่อนข้างมีความหลากหลายตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการนำไปใช้ประโยชน์ แต่หากสรุปในภาพรวมแล้วจะเห็นได้ว่าซิลิคอนส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตโลหะอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสม รองลงมา คือ อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ ส่วนที่เหลือจะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตเฟอโรซิลิคอน ซึ่งคิดเป็นปริมาณเกือบร้อยละ 50 และมีเพียงร้อยละ 5 ที่ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่สัดส่วนของการนำซิลิคอนไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแบ่งออกตามประเภทผลิตภัณฑ์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 17 สัดส่วนการบริโภคซิลิคอนในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

(ที่มา http://www.unidux.co.jp/e/annualreport2003)

10. สรุป

จากการศึกษาการนำแร่ซิลิกามาเข้ากระบวนการคัดแยก และแต่งแร่ด้วยกรรมวิธีทางโลหกรรม จากนั้นจึงนำเข้าสู่กระบวนการถลุงเพื่อให้ได้เป็นซิลิคอนบริสุทธิ์สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ตามความเหมาะสมของซิลิคอนในแต่ละเกรด ซึ่งนับเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรแร่ที่มีอยู่อย่างมากมายของประเทศ ให้มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ สอดคล้องกับยุทธศาสตร์กระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการเพิ่มมูลค่าแร่พื้นฐานของประเทศให้เป็นแร่เศรษฐกิจ อันจะนำมาซึ่งรายได้เข้าประเทศได้อย่างมหาศาล และยั่งยืน ทั้งนี้ จำเป็นอย่างยิ่งในการขอรับความสนับสนุนจากภาครัฐเพื่อการประเมินพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ และความคุ้มทุนของการจัดตั้งโรงงานประกอบโลหกรรมถลุงซิลิกา ให้ได้เป็นซิลิคอนบริสุทธิ์ (เกรดโลหกรรม) ขึ้นในประเทศไทย นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วนี้ สิ่งสำคัญที่ผู้ประกอบการต้องให้ความสนใจ นั่นคือ การดูแล และควบคุมระบบสิ่งแวดล้อมอันอาจเกิดจากกระบวนการประกอบโลหกรรมดังกล่าว ซึ่งจะนำมาสู่ปัญหาการร้องเรียนสุขภาพ ความมั่นคงทางเศรษฐกิจ และการยอมรับในมาตรฐานสินค้าจากทั่วโลก เนื่องจากการแข่งขันด้านการค้า การตลาดในปัจจุบัน ประเทศไทยนับได้ว่าไม่เป็นรองในด้านคุณภาพสินค้า หากแต่ผู้ประกอบการร่วมมือกัน ทั้งจากภายในองค์กร และบรรดาพันธมิตร ในการช่วยกันดูแล จัดการระบบควบคุม ป้องกัน และรักษาสิ่งแวดล้อมให้สะอาด ปลอดภัย ดังนี้ ก็จะเป็นแนวทางให้สินค้าไทยมุ่งสู่ตลาดโลกได้ โดยไม่ติดในเงื่อนไข หรือมาตรการทางการค้าที่ไม่ใช่ภาษี ของกลุ่มองค์กรการค้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สิ่งที่ควรตระหนัก และให้ความสำคัญอีกประการหนึ่ง นั่นคือ อุตสาหกรรมที่ประกอบโลหกรรมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน เช่น การหลอม และถลุงเพื่อให้ได้โลหะบริสุทธิ์ ค่าใช้จ่ายของการดำเนินการส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับค่าไฟฟ้า และพลังงานเป็นหลัก ซึ่งหากสามารถควบคุม และจำกัดต้นทุนในการจัดการกระบวนการดังกล่าวได้ จะช่วยให้ค่าใช้จ่ายที่ผู้ประกอบการรับผิดชอบลดลง และเป็นแนวทางสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตได้ นอกจากนี้ การดูแล และรักษาควบคุมระบบป้องกัน และกำจัดมลภาวะอันเกิดจากการผลิตนับเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านการจัดการ และกำจัดของเสีย อีกทั้ง ยังเป็นผลดีในด้านการลดต้นทุนการนำเข้าวัตถุดิบของอุตสาหกรรมอีกทางหนึ่งด้วย

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

เอกสารที่ไม่ได้ตีพิมพ์

ดุสิต เครืองาม และคณะ. ข้อเสนอโครงการศึกษาลู่ทางการลงทุนจัดตั้งอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย, 1 สิงหาคม 2544.

ฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์

ศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. เซลล์แสงอาทิตย์, (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก : www.nstda.or.th/ectec/content_faq.htm, August 2001, 2544.

ภาษาต่างประเทศ

Electronic Data Base

_____. Minerals and Metals availability in New South Wales. New South Wales Department of Mineral Resources. (Online). Available : http://www.minerals.nsw.gov.au/commod/minavail/indminrs.htm, 2001.

_____. Silicon. (Online). Available : http://www.webelements.com, December 2003.

_____. Silicon Products. Department of Industry and Resources. Government of Western Australia. (Online). Available : http://www.doir.wa.gov.au.

_____. Silicon. (Online). Available : http://www.an.psu.edu/rxg1/pt1999/silicon.html, 2003

EUROSIL. What is Silica? (Online). Available : http://www.ima-eu.org/en/silwhat.html, 2003

G.J.M. Phylipsen and E.A. Alsema. Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules. Department of Science, Technology and Society Utrecht University The Netherlands (Online). Available : http://www.chem.uu.nl/nws/www/publica/95057.pdf, September 1995

IGS. Production of Industrial Grade Silicon. (Online). Available : http://www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/large_proj/silicon.PDF, 2003.

Jack L.Stone. Photovoltaics : Unlimited Electrical Energy From the Sun. (Online). Available : http://www.nrel.gov/research/pv/docs/pvpaper.html, 1993.

Key Center for Photovoltalic Engineering UNSW. Solar Cells. (Online). Available : http://www.pv.unsw.edu.au, August 2001.

Lisa A Corathers. Silicon. US. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries; P 148-149. (Online). Available : http://www.usgs.gov, January,2004

Roskill. News & Press Releases : "Silicon and Ferrosilicon market move in different directions". (Online). Available : http://www.roskill.com, 2004.