บทที่ 1
การคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจก จากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์อย่างละเอียด

การศึกษาในปีที่ 1 เป็นการคำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์โดยใช้ข้อมูลจากรายงานอื่นทั้งหมด และทำการปรับค่าโดยใช้สัดส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิต แต่สำหรับการศึกษาในปีที่ 2 นี้ การคำนวณจะมีความละเอียดมากขึ้น โดยใช้ข้อมูลการใช้พลังงาน ปริมาณเชื้อเพลิง รวมถึงผลกระทบที่เกิดจากแหล่งที่มาวัตถุดิบ เช่น กำหนดให้มีการใช้ยูเรเนียมจากประเทศแคนาดา และขั้นตอนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงอยู่ในประเทศฝรั่งเศส และพิจารณาผลกระทบจากการขนส่ง การก่อสร้าง การกำจัดกากของเสีย และการรื้อถอนโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ร่วมด้วย โดยยกตัวอย่างการคำนวณจากข้อมูลของเทคโนโลยี EPR ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ขั้นตอนการประเมิน

1.1.1 กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการประเมิน (Goal and Scope Definition)

เป้าหมายของการศึกษานี้คือ การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ชนิด EPR

ขอบเขตของการศึกษานี้กำหนดให้ครอบคลุมขั้นตอนของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์โดยแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ

(1) วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหน้า (Front-end) ประกอบด้วย การทำเหมือง (Mining) การสกัดยูเรเนียม (Milling) การทำให้บริสุทธิ์ (Refinery) การแปรสภาพ (Conversion) การเสริมสมรรถนะ (Enrichment) และ การขึ้นรูป (Fuel fabrication)

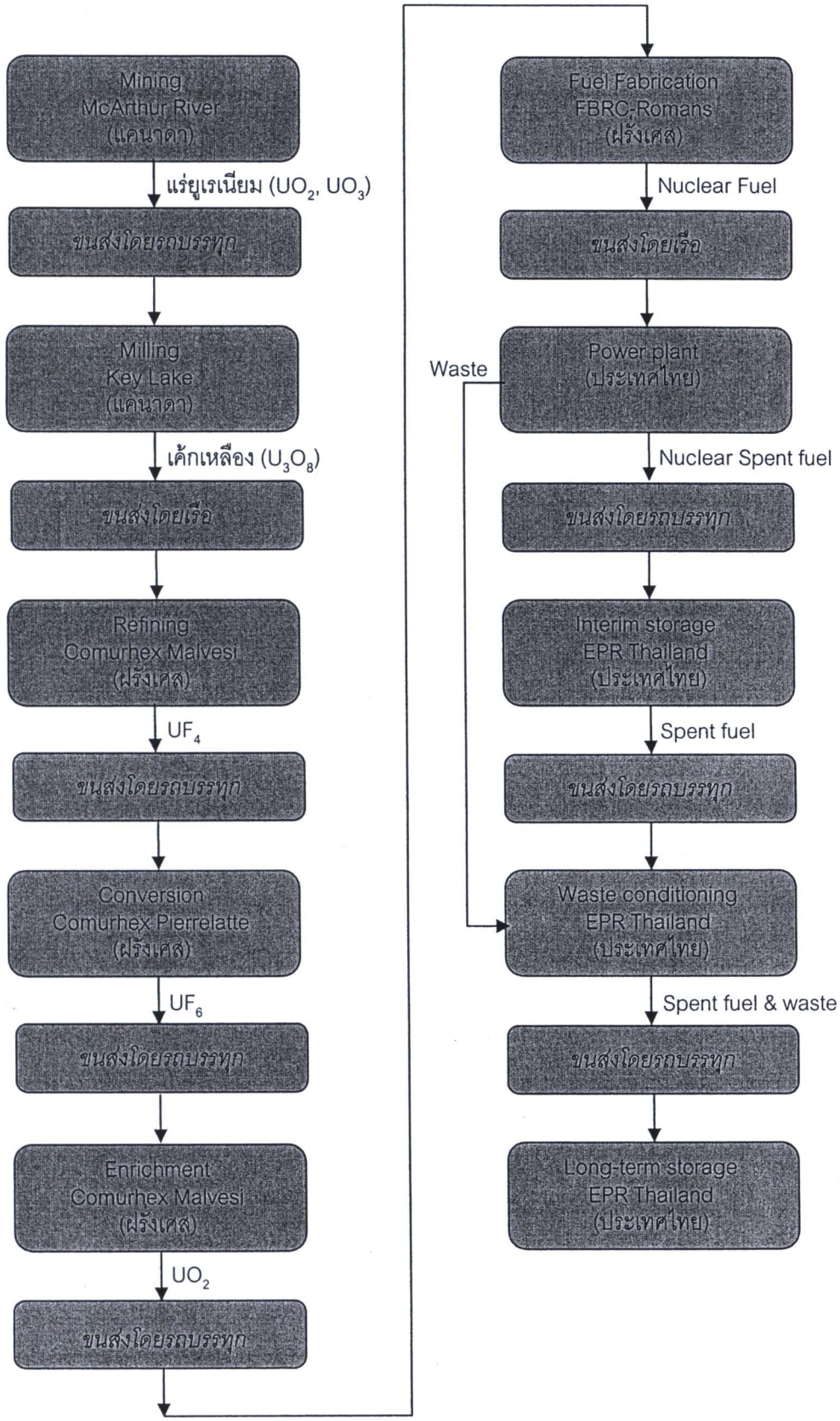
(2) การดำเนินการผลิตไฟฟ้า (Operation)

(3) วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหลัง (Back-End) ประกอบด้วย การเก็บรักษากากชั่วคราว (Interim storage) และ การกำจัดกากระยะยาว (Long-term storage)

(4) การก่อสร้างโรงไฟฟ้า (Construction)

(5) การรื้อถอน (Decommissioning)

รูปแบบของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่พิจารณาเป็นวัฏจักรเชื้อเพลิงแบบเปิด หรือ Once-through nuclear fuel cycle แสดงดังรูปที่ 1.1 และหน่วยอ้างอิง (Functional unit) คือ การผลิตไฟฟ้าปริมาณ 1 kWh ซึ่งผลิตจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ EPR ขนาดกำลังผลิต 1,630 MW



รูปที่ 1.1 ขอบเขตการศึกษา

1.1.2 **การวิเคราะห์บัญชีรายการ** (Life cycle inventory analysis)

(1) ที่มาของข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเป็นข้อมูลประเภททุติยภูมิ ที่ไม่ได้เกิดจากการทำการทดลอง โดยแหล่งที่มาของวัตถุดิบยูเรเนียมตั้งต้น และสถานที่ตั้ง Plant ของแต่ละขั้นตอนภายในวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อให้ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณ (ตารางที่ 1.1)

แหล่งที่มาของแร่ยูเรเนียมได้เลือกเหมืองที่กลุ่มบริษัท Areva เป็นผู้ประกอบการ โดยสมมติเลือกเหมืองยูเรเนียมที่ใหญ่ที่สุดในโลก คือ เหมือง McArthur River ซึ่งตั้งอยู่ในประเทศแคนาดา มีการทำเหมืองเป็นแบบเหมืองใต้ดิน (Underground) และการผลิตเค้กเหลือง (Yellow cake) หรือ U_3O_8 ที่ Key Lake Milling Plant ซึ่งตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของเหมือง McArthur River ห่างออกไปเป็นระยะทางประมาณ 80 km ส่วนขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ตั้งแต่ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ การแปรสภาพ การเสริมสมรรถนะ และการขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้เลือกจากแหล่งผลิตในประเทศฝรั่งเศสเนื่องจากเป็นต้นกำเนิดของเทคโนโลยี EPR โดยเค้กเหลือง (U_3O_8) จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ (UF_4) ที่ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ก่อนจะถูกส่งไปขั้นตอนการแปรสภาพเพื่อเปลี่ยนรูปไปเป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออกไรด์ (UF_6) เพื่อให้สามารถนำไปเสริมสมรรถนะได้และหลังการเสริมสมรรถนะก็จะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) จากนั้นจึงนำยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) ที่ได้มาอัดให้เป็นแท่งขนาดเล็ก (UO_2 Pellet) และบรรจุในแท่งเชื้อเพลิง (Fuel rod) และมัดรวมเป็นชุดพร้อมนำไปใช้งาน เชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะถูกขนส่งมายังประเทศไทยซึ่งเป็นสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ EPR ซึ่งอายุของโรงไฟฟ้าอยู่ที่ 60 ปี โดยมีช่วงระยะเวลาการก่อสร้างประมาณ 5 ปี และเมื่อสิ้นสุดการใช้งานโรงไฟฟ้าโรงไฟฟ้าจะถูกรื้นถอนภายใน 12 ปี การขนส่งวัตถุดิบและอุปกรณ์การผลิตกระแสไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกขนย้ายด้วยพาหนะที่แตกต่างกันแล้วแต่ความเหมาะสม เช่น ขนส่งทางเรือ และรถบรรทุก ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการขนส่งแสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 สถานที่ตั้ง Plant ต่างๆ

ขั้นตอน	ที่ตั้ง (ประเทศ)
Mining	McArthur River Mine (แคนาดา)
Milling	Key Lake Milling Plant (แคนาดา)
Refinery	Comurhex Malvesi Refinery Plant (ฝรั่งเศส)
Conversion	Comurhex Pierrelattle Conversion Plant (ฝรั่งเศส)
Enrichment	Eurodif Enrichment Plant (ฝรั่งเศส)
Fuel fabrication	FBFC Fuel Fabrication Plant (ฝรั่งเศส)
Operation	ประเทศไทย
Construction	
Interim and Long-term storage	
Decommissioning	

ตารางที่ 1.2 ระยะทางการขนส่ง

พาหนะ	วัตถุดิบ	เส้นทาง	ระยะทาง (กม.)
รถบรรทุก	Uranium ore slurry	McArthur River → Key Lake	80
รถบรรทุก	Yellow cake	Key Lake → Point Tupper	4,380
เรือ	Yellow cake	Point Tupper→Fos	6,049
รถบรรทุก	Yellow cake	Fos→Malvesi	213
รถบรรทุก	UF_4	Malvesi – Tricastin (Pierrellatte)	234
รถบรรทุก	UF_6 enriched	Tricastin (Eurodif) → Romans	20.4
รถบรรทุก	UO_2 pellets	Romans→Marseilles	235
เรือ	UO_2 pellets	Marseilles → Bangkok	13,560

ที่มา: http://www.portworld.com/map/ และ http://maps.google.co.th/

พารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อใช้ในการคำนวณผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 1.3 ประกอบด้วยคุณสมบัติของแร่ การใช้พลังงาน การสูญเสียผลิตภัณฑ์ กำลังการผลิตของโรงไฟฟ้า

ตารางที่ 1.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

Process	Parameters	Value	Unit	References
Mining	-Waste/Ore Ratio	3		IAEA
	-Natural uranium assay	0.71	%U-235	Vuono and Lee (2009)
	-Ore grade	12.75	$\%U_3O_8$	IAEA
	-Waste rock grade	0.03	% U_3O_8	CAMECO Mine
	-Diesel consumption	14.43	MJ/t of rock	Own calculation
	-Electricity consumption	17.65	kWh/t of rock	Own calculation
Milling	-Extraction Losses	1.6	%	CAMECO Mine
	-Diesel consumption	483	MJ/t of ore	WISE
	-Electricity consumption	18.6	kWh/t of ore	WISE
Refinery	-Losses	1	%	Assumption
Conversion	-Losses	1	%	Assumption
Enrichment	-Enriched uranium	4.3	%U-235	Areva[4]
	-Tails Assay	0.3	%U-235	Faghihi (2008)
	- Specific Electricity Consumption	2,400	kWh/SWU	Done (1996)
Fuel Fabrication	-Losses	1	%	Assumption
Power Plant	-Fuel Burn up	70	GWd/TU	Areva[4]
	-Efficiency	37	%	Areva[3]
	-Capacity factor	94	%	Areva[4]
	-Net Capacity	1,630	MW	Areva[1]
	- Life time	60	Year	Areva[3]
Construction	- Electricity	245,650,593	kWh/plant	Own calculation
	- Thermal energy	9,976,908	GJ/plant	Own calculation
Long-term storage	-Water	1,514	m^3/plant	ISA (2006)
	-Electricity	167,000	kWh/year	ISA (2006)
	-Thermal energy	6,480,000	MJ/year	ISA (2006)
Decommissioning	- Electricity	12,828,144	kWh/year	Own calculation
	-Thermal energy	923,818	MJ/year	Own calculation

(2) การคำนวณ

สมมติฐานการประเมินผลกระทบการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีดังนี้

1. ไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ระหว่างกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงยูเรเนียมได้มาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงตามแต่ละประเทศผู้ผลิต โดยปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยออกมาจากการผลิตกระแสไฟฟ้า1 kWh ในแต่ละประเทศมีดังนี้ ประเทศแคนาดา 0.218 kg CO_2-e/kWh ประเทศฝรั่งเศส 0.073 kg CO_2e/kWh และประเทศญี่ปุ่น 0.355 kg CO_2e/kWh (United Nations Environment Programme, 2007) สำหรับการใช้ไฟฟ้าในประเทศไทยระหว่างการก่อสร้างได้มาจากไฟฟ้าผสมจากหลายแหล่งกำเนิด โดยมีค่า emission factor ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.561 kg CO_2e/kWh (guideline for carbon footprint of product, 2010) และถ้าแหล่งกำเนิดไฟฟ้าใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียวจะมีค่า ค่า emission factor ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.936 kg CO_2/kWh (WISE)
2. ในการทำเหมืองยูเรเนียมทั่วไปกำหนดให้สัดส่วนของเสียกับปริมาณแร่ หรือ Waste to Ore ratio (W/O)อยู่ในช่วง 1 ถึง 5 สำหรับการทำเหมืองแบบ Underground พลังงานที่ใช้ในการทำเหมืองอาศัยพลังงานจากพลังงานไฟฟ้า และการเผาไหม้ของดีเซล ซึ่งการทำเหมืองแบบ underground ใช้พลังงาน 70.6 kWh/ton ore และ 57.7 MJ diesel/ton ore การคำนวณกำหนดให้ระบบที่ศึกษาใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมจากการทำเหมืองแบบ underground มี W/O เฉลี่ยเท่ากับ 3 โดยที่พลังงานไฟฟ้าและดีเซลที่ใช้ต่อถ่านหินหนึ่งตันมีค่า 17.65 kWh/ton rock และ 14.43 MJ diesel/ton rock
3. ปริมาณสารเคมี กรดไนตริก (HNO_3) แอมโมเนีย (NH_3) และกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่ใช้ในขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ (Refinery) คำนวณมาจากปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ดังสมการ (รายละเอียดการคำนวณ ภาคผนวก ก):

$$2U_3O_8 + 16HNO_3 \rightarrow 6UO_2(NO_3)_2 + 4NO_2 + 8H_2O$$

$$6UO_2(NO_3)_2 + 26NH_3 \rightarrow 3(NH_4)2U_2O_7 + 27H_2O + 16N_2$$

$$3(NH_4)2U_2O_7 + 18O_2 \rightarrow 6UO_3 + 12H_2O + 6NO$$

$$6UO_3 + 6H_2 \rightarrow 6\,UO_2 + 6H_2O$$

$$6UO_2 + 24HF \rightarrow 6UF_4 + 12H_2O$$

และปริมาณกรดซัลฟลูริก (H_2SO_4) และ แอมโมเนีย (NH_3) ในขั้นตอน Milling ได้มาจาก Mudd and Diesendorf (2008)

4. ขนาดโรงไฟฟ้าเทคโนโลยี EPR เท่ากับ 1,630 MW และปริมาณเชื้อเพลิงยูเรเนียมที่ต้องการในการดำเนินการในโรงไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการ

$$\text{Ton of uranium} = \frac{\text{Power plant capacity (MW)} \times \text{Capacoty factor (\%)} \times \text{Operating time (day)}}{\text{Burn up rate (GWd/tU)} \times \text{Thermal efficiency (\%)}}$$

ปริมาณของเชื้อเพลิงยูเรเนียมที่ใช้แล้ว (Spent fuel) เท่ากับปริมาณเชื้อเพลิงสายป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 18,950 kg/m^3 (Emsley,1999)

5. พิจารณาเฉพาะการขนส่งจากต่างประเทศเท่านั้น ส่วนการขนส่งภายในประเทศยังไม่นำมาคิด
6. การก่อสร้างโรงไฟฟ้าเกิดขึ้นในประเทศไทย แต่ยังไม่ระบุพื้นที่แน่ชัด จึงไม่คิดผลกระทบจากการขนส่งภายในประเทศ
7. ผลกระทบจากการก่อสร้างโรงไฟฟ้าในส่วนของวัสดุก่อสร้างคิดเฉพาะวัสดุที่ใช้ในปริมาณมากคือ คอนกรีต และเหล็ก โดยกำหนดให้คอนกรีตที่ใช้เป็นชนิดที่มีความหนาแน่นสูง 3,630 kg/m^3 (Mukherjee,1992) และสมมติให้คอนกรีตทั้งหมดผลิตภายในประเทศ และนำเข้าเหล็กทั้งหมดจากประเทศญี่ปุ่น ปริมาณคอนกรีตและเหล็กทั้งหมดของเทคโนโลยี EPR โดยประมาณ 1,089,000 และ 130,020 ตัน ตามลำดับ (Areva[1])
8. สมมติฐานอื่นๆ
    - กระบวนการ ทำเหมือง (Mining) และ การสกัดยูเรเนียม (Milling) ดำเนินการในประเทศแคนาดา
    - แร่ยูเรเนียมถูกขนส่งทางเรือจากประเทศแคนาดาเข้าประเทศฝรั่งเศส เพื่อผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Refinery), การแปรสภาพ (Conversion), การเสริมสมรรถนะ (Enrichment) และขั้นตอนสุดท้ายคือ การขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง (Fuel fabrication)
    - ขั้นตอน Enrichment ดำเนินการด้วยวิธีการแพร่ (Diffusion) และใช้พลังงานในการแยก 2,400 kWh/SWU (Done, 1996)
    - แท่งเชื้อเพลิงถูกขนส่งทางเรือจากประเทศฝรั่งเศสเข้าสู่ประเทศไทย
    - เส้นทางการขนส่งกำหนดดังตารางที่ 1.2 ประกอบด้วยเหมือง McArthur River Mine และสถานที่สกัดแร่ยูเรเนียมอยู่ที่ Key Lake (ประเทศแคนาดา) ท่าเรือ Point Tupper (แคนาดา) ท่าเรือ Fos และ Marseilles (ฝรั่งเศส) สถานที่ตั้ง refinery plant คือ Malvesi (ฝรั่งเศส) สถานที่ตั้ง Conversion plant และ

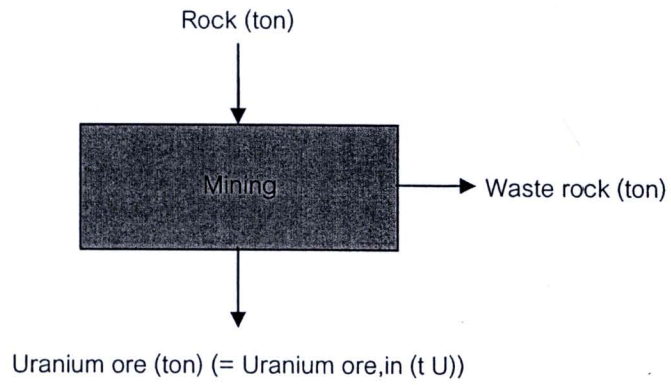
Enrichment plant คือ Tricastin และสถานที่ตั้ง Fuel fabrication plant คือ Romans

สารขาเข้าและสารขาออกสำหรับแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จะขึ้นกับปริมาณยูเรเนียมในแต่ละขั้นตอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำสมดุลมวลสารของยูเรเนียมตลอดทั้งวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เพื่อหาปริมาณปริมาณเชื้อเพลิงยูเรเนียมที่ต้องการสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า 1 kWh ซึ่งพารามิเตอร์ที่ช่วยในการคำนวณแสดงในตารางที่ 1.4 จากนั้นคำนวณสมดุลมวลย้อนกลับไปยังขั้นตอนต่าง ๆ ของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหน้าเพื่อหาปริมาณยูเรเนียมที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน โดยมีรายละเอียดของสมดุลมวลสำหรับแต่ละขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ 1.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณสมดุลมวล

พารามิเตอร์	**ค่า**	**หน่วย**
Natural assay (Uranium)	0.71	%U-235
Days per year	365	Days
Hours per day	24	Hours
U_3O_8 ratio	$\frac{3\times 238}{(3\times 238)+(8\times 16)}$	
UF_6 ratio	$\frac{238}{238+(6\times 19)}$	
UO_2 ratio	$\frac{238}{238+(2\times 16)}$	
UF_4 ratio	$\frac{238}{238+(4\times 19)}$	

Mining



Rock = Uranium ore + Waste rock (1.1)

Waste rock= Uranium ore x Waste/Ore ratio (1.2)

Uranium ore,in = Uranium ore x Ore grade (1.3)

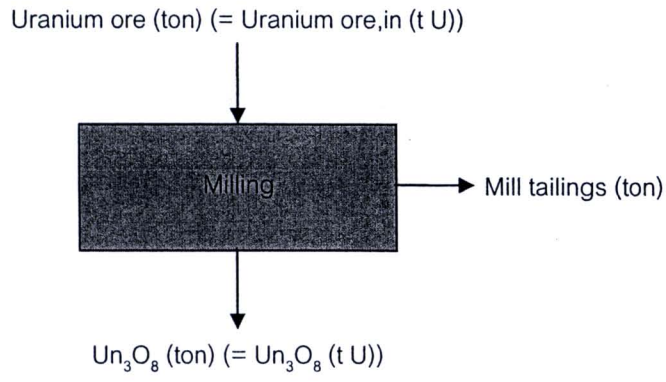
โดยที่

Uranium ore [=] Weight of uranium ore in t (ton)

Uranium ore, in [=] Weight of uranium ore in tU (ton of total uranium)

Ore grade [=] %

Milling



Un_3O_8 = Uranium ore x (1 – Extraction losses) (1.4)

Un_3O_8, in = Un_3O_8 x U_3O_8 ratio (1.5)

Mill tailings = Uranium ore – Un_3O_8 (1.6)

โดยที่

Un_3O_8 [=] Weight of natural U_3O_8 in t (ton)

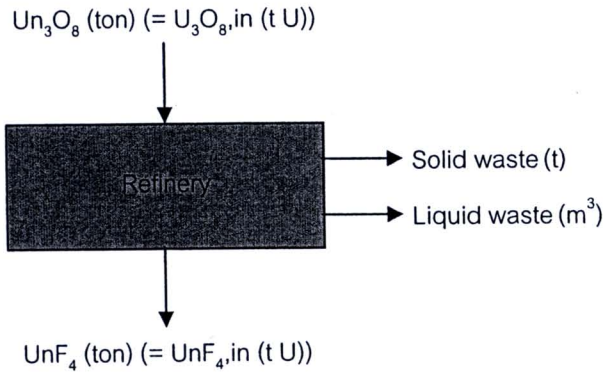
Un_3O_8, in [=] Weight of natural U_3O_8 in tU (ton of total uranium)

Uranium ore [=] Weight of uranium ore in t (ton)

Uranium ore, in [=] Weight of uranium ore in tU (ton of total uranium)

Extraction losses [=] %

Refinery



$UnF_4 = Un_3O_8 \times (1 - \text{Refinery losses})$ (1.7)

UnF_4, in = $UnF_4 \times UF_4$ ratio (1.8)

โดยที่

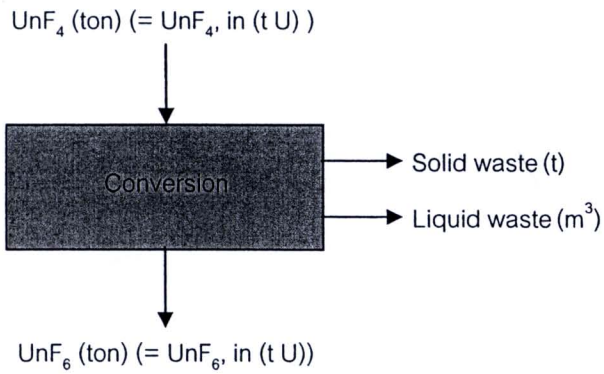
Un_3O_8 [=] Weight of natural U_3O_8 in t (ton)

UnF_4 [=] Weight of natural UF_4 in t (ton)

UnF_4, in [=] Weight of natural UF_4 in tU (ton of total uranium)

Refinery losses [=] %

Conversion



$$UnF_6 = UnF_4, \text{ in} \times (1 - \text{Conversion losses}) \quad (1.9)$$

$$UnF_6, \text{in} = UnF_6 \times UF_6 \text{ ratio} \quad (1.10)$$

โดยที่

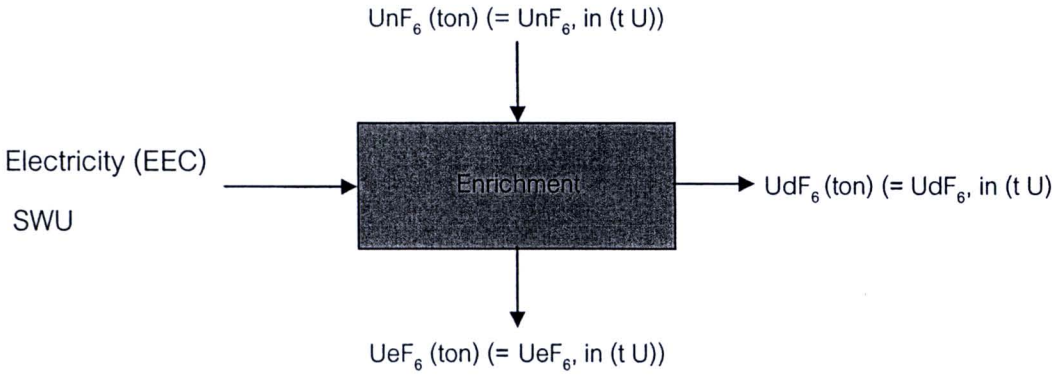
UnF_4, in [=] Weight of natural UF_4 in tU (ton of total uranium)

UnF_6 [=] Weight of natural UF_6 in t (ton)

UnF_6, in [=] Weight of natural UF_6 in tU (ton of total uranium)

Conversion losses [=] %

Enrichment



$$UeF_6 = UnF_6 \times \frac{(\text{Natural assay} - \text{Tails assay})}{(\text{Product assay} - \text{Tails assay})} \quad (1.11)$$

$$UeF_6, \text{in} = UeF_6 \times UF_6 \text{ ratio} \quad (1.12)$$

$$UdF_6 = UnF_6 \times \frac{(\text{Product assay} - \text{Natural assay})}{(\text{Product assay} - \text{Tails assay})} \quad (1.13)$$

$$UdF_6, \text{in} = UdF_6 \times UF_6 \text{ ratio} \quad (1.14)$$

$$SWU = 1{,}000 \times UF_6 \text{ ratio} \times (UeF_6 \times SWUe + UdF_6 \times SWUd - UnF_6 \times SWUn) \quad (1.15)$$

$$EEC\ (GWh_e) = \frac{SWU \times \text{Specific electricity comsumption}}{1{,}000{,}000} \quad (1.16)$$

$$SWUe = \left(2 \times \frac{\text{Product assay}}{100} - 1\right) \times \ln\left[\frac{\frac{\text{Product assay}}{100}}{1 - \frac{\text{Product assay}}{100}}\right] \quad (1.17)$$

โดยที่

EEC = Electricity consumption

UnF_6 [=] Weight of natural UF_6 in t (ton)

UnF_6,in [=] Weight of natural UF_6 in tU (ton of total uranium)

UdF_6 [=] Weight of depleted UF_6 in t (ton)

UdF_6,in [=] Weight of depleted UF_6 in tU (ton of total uranium)

UeF_6 [=] Weight of enriched UF_6 in t (ton)

UeF_6,in [=]Weight of enriched UF_6 in tU (ton of total uranium)

SWUn [=] SWU of natural UF_6

SWUd [=] SWU of depleted UF_6

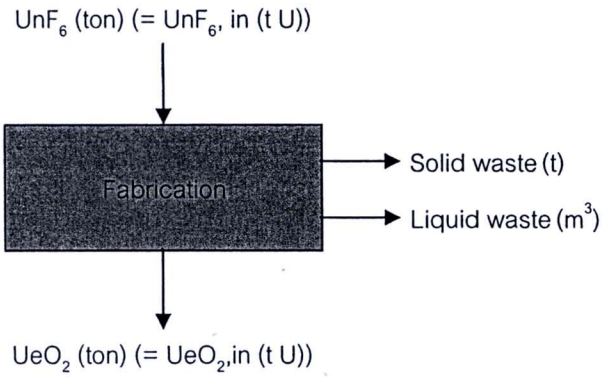
SWUe [=] SWU of enriched UF_6

Natural assay [=] %

Tails assay [=] %

Product assay [=] %

Fuel Fabrication Plant



$UeO_2 = UeF_6 \times (1\text{-}FF_{Losses})$ (1.18)

UeO_2, in = UeO_2 x UeO_2 ratio (1.19)

โดยที่

UeF_6 [=] Weight of enriched UF_6 in t (ton)

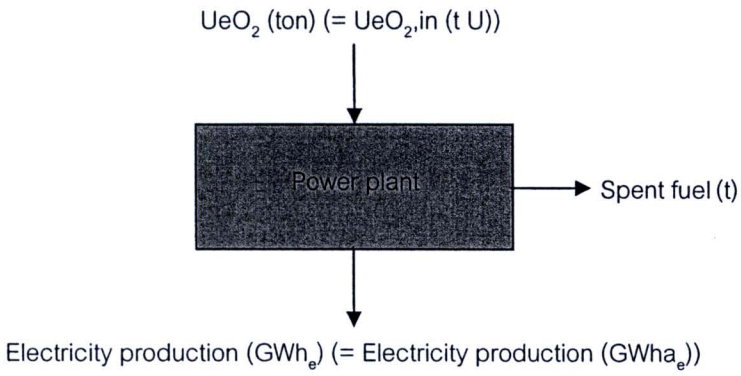
UeO_2 [=] Weight of enriched UO_2 in t (ton)

UeO_2,in [=] Weight of enriched UO_2 in tU (ton of total uranium)

FF_{Losses} = Fuel fabrication losses [=] %

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

Operation



Spent fuel = UeO_2 (1.20)

Electricity production (GWh) =

UeO_2, in x Fuel burn up x Efficiency x Hours per day (1.21)

Electricity production (GWy) = Net capacity x Capacity factor (1.22)

โดยที่

Fuel burn up [=] GWd/t U

Efficiency [=] %

Capacity factor [=] %

Net capacity [=] GWy

UeO_2 [=] Weight of enriched UO_2 in t (ton)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 25 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน 246355
เลขเรียกหนังสือ

จากการคำนวณสมดุลมวลยูเรเนียมในแต่ขั้นตอน จะได้ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออก ดังรูปที่ 1.2

Input				Output		
Rock	Kg	6.08E-7	Mining	Ore	Kg	1.52E-7
				Waste	Kg	4.11E-7
Ore	Kg	1.52E-7	Milling	Un_3O_8	Kg	1.91E-8
				Mill tailing	Kg	1.33E-7
Un_3O_8	Kg	1.91E-8	Refinery	UnF_4	Kg	2.11E-8
UnF_4	Kg	2.11E-8	Conversion	UnF_6	Kg	2.35E-8
UnF_6	Kg	2.35E-8	Enrichment	UeF_6	Kg	2.40E-9
UeF_6	Kg	2.40E-9	Fuel fabrication	UeO_2	Kg	1.83E-9
UeO_2	Kg	1.83E-9	Power plant	Electricity	KWh	1
				Spent fuel	Kg	1.83E-9
Spent fuel	Kg	1.83E-9	Interim storage	Spent fuel	Kg	1.83E-9
Spent fuel	Kg	1.83E-9	Long-term storage	Spent fuel	Kg	1.83E-9

รูปที่ 1.2 ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า 1 kWh

(3) ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ปริมาณก๊าซเรือนกระจกคำนวณได้จากสมการ (1.23) และ (1.24) ดังนี้

$$CE = EC \text{ or } CM \times EF \tag{1.23}$$

$$GHG = \frac{CE}{EO \times CF \times OT} \tag{1.24}$$

เมื่อ CE = Carbon dioxide Equivalent (gCO_2e)

EC = Energy Consumption (GWh or TJ)

CM = Construction Material (ton)

EF = Emission Factor (gCO_2e/ TJ or gCO_2e/GWh or gCO_2e/ton)

GHG = Greenhouse gas emission (gCO_2e/kWh)

EO = Electricity Output (MW)

CF = Capacity Factor (%)

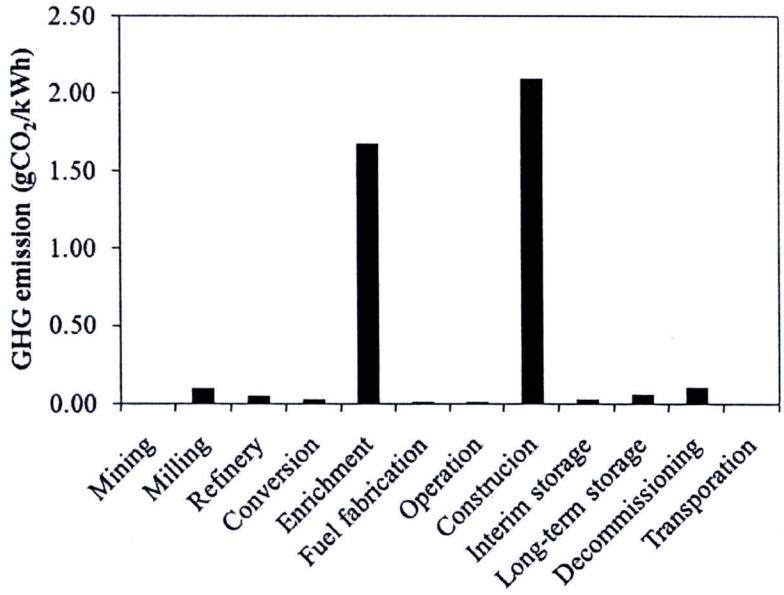
t = Operating Time (h)

1.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

1.2.1 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบเปิดของเทคโนโลยี EPR

วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เทคโนโลยี EPR มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด 4.17 gCO_2/kWh กราฟรูปที่ 1.3 แสดงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากแต่ละขั้นตอนพบว่า ขั้นตอน Construction และขั้นตอน Enrichment มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดประมาณ 50% และ 40% จากปริมาณการปลดปล่อยทั้งหมด เนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างใช้พลังงานค่อนข้างสูง จึงมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมาก และในส่วนของขั้นตอน Enrichment โดยทั่วไป Plant ในประเทศฝรั่งเศส มีการใช้วิธี Diffusion กันเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใช้พลังงานในการเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียมค่อนสูง (2,400 kWh/SWU) จึงทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมากเช่นกัน ในส่วนของขั้นตอนอื่นๆ ซึ่งมีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกค่อนข้างน้อย อาจเป็นเพราะการกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณ เช่น ค่า Burn-up rate มีค่าสูง (70 GWd/tU) ทำให้ผลกระทบจากการเตรียมเชื้อเพลิงจากขั้นตอนส่วนหน้าของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพียงเล็กน้อย โดยแยกแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 1.5

ในส่วนของผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น Waste to ore ratio, Ore grade, ความเข้มข้นของ U-235, ค่าBurn-up rate และอื่นๆ จะถูกศึกษาความอ่อนไหวและผันแปรในบทที่ 2 ต่อไป



รูปที่ 1.3 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละขั้นตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากเทคโนโลยี EPR

ตารางที่ 1.5 แหล่งกำเนิดและปริมาณก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอน

Stage	Sources	GHG emission (gCO_2/kWh)
Mining	Diesel production	9.62E-05
	Diesel combustion	6.49E-04
	Electricity production	0.00234
	Total	**0.00308**
Milling	Diesel production	8.05E-04
	Diesel combustion	0.00543
	Electricity production	6.17E-04
	H_2SO_4 production	0.070
	NH_3 production	0.021
	Total	**0.0979**
Refinery	Fuel production	0.00284
	Fuel combustion	0.0155
	Electricity production	0.00257
	HNO_3 production	0.00696
	NH_3 production	0.0118
	HF production	0.00915
	Total	**0.0489**
Conversion	Others	0.0246
	Total	**0.0246**
Enrichment	Electricity	1.67
	Natural gas production and combustion	0.00322
	Others	0.00689
	Total	**1.68**
Fuel fabrication	Refrigerants	0.000869
	NG production	0.00118
	NG Combustion	0.00653
	Electricity production	0.00693
	Total	**0.0155**
Operation	Diesel combustion	0.0100
	Diesel production	0.00148
	Total	**0.0115**

ตารางที่ 1.5 แหล่งกำเนิดและปริมาณก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอน (ต่อ)

Stage	Sources	GHG emission (gCO_2/kWh)
Back-end	Interim storage	0.0258
	Long-term storage	0.0620
	Total	**0.0878**
Construction	Concrete production	0.703
	Steel (for reinforced concrete) production	0.141
	Steel (for components and pipes) production	0.0204
	Electricity production	0.171
	Thermal consumption	1.053
	Total	**2.088**
Decommissioning	Electricity production	0.00894
	Thermal consumption	0.0975
	Total	**0.106**
Transportation		**0.0111**
Total GHG Emission		**4.17**

1.2.2 ผลกระทบจากแหล่งที่มาของไฟฟ้าที่ใช้ในวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

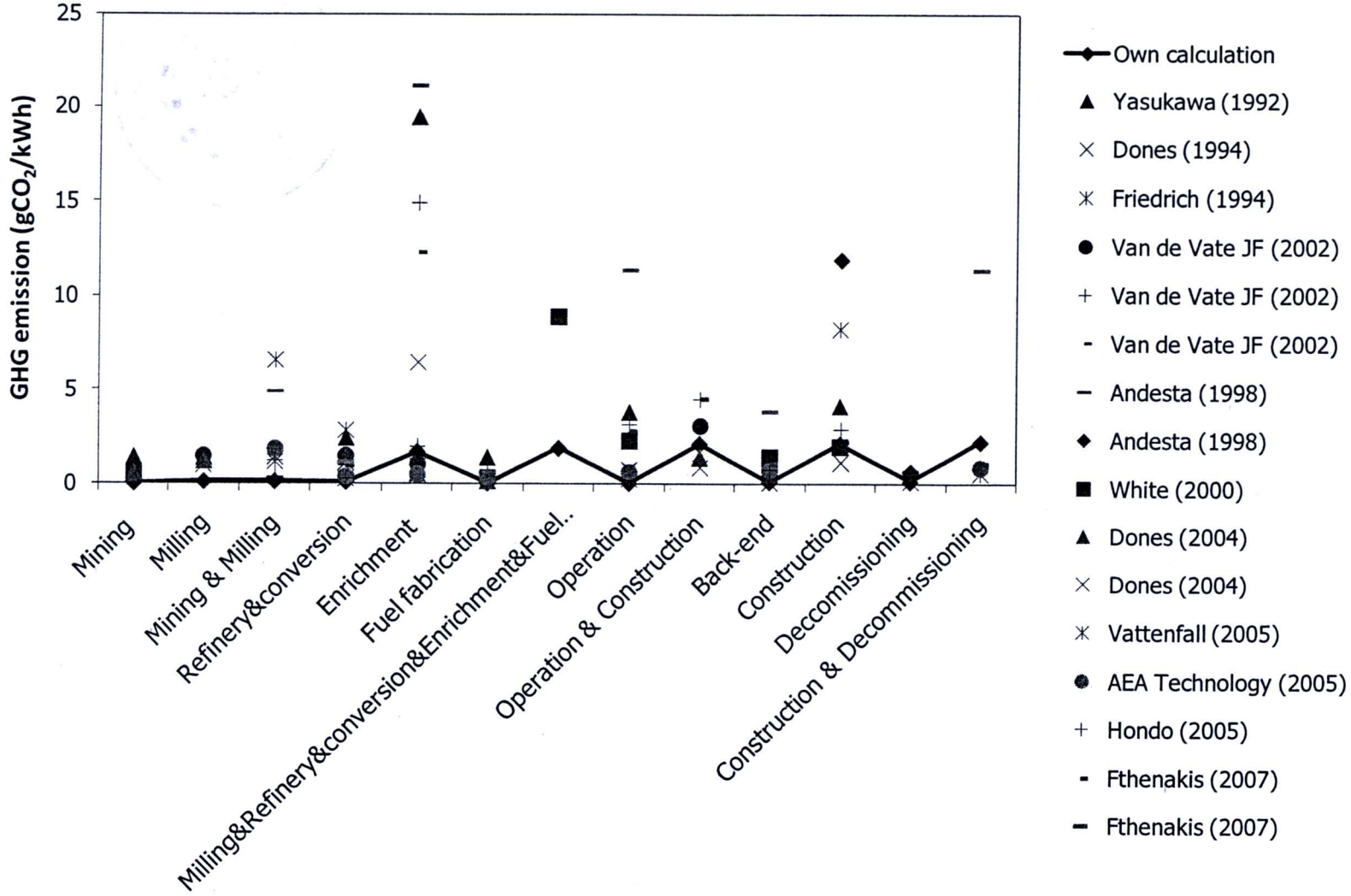
จากสมมติฐานซึ่งกำหนดให้การใช้ไฟฟ้าสำหรับการเตรียมและผลิตแท่งเชื้อเพลิงตลอดทั้งวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ รวมทั้งการก่อสร้าง และการรื้อถอน ได้มาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงตามแต่ละประเทศผู้ผลิต พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดอยู่ที่ 4.17 gCO_2/kWh (หัวข้อที่ 1.2.1) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากเชื้อเพลิงถ่านหินชนิดเดียว จากตารางที่ 1.6 จะเห็นได้ว่า ขั้นตอน Enrichment ได้รับผลกระทบมากที่สุด ปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นประมาณ 20 เท่า เมื่อใช้ถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 1.6 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอน

Stage	GHG emissions (gCO_2/kWh)	
	Local power plant supply electricity	Coal-fired power plant supply electricity
Mining	0.00309	0.0108
Milling	0.0979	0.0999
Refinery	0.0489	0.079
Conversion	0.0246	0.0246
Enrichment	1.68	21.4
Fuel fabrication	0.0155	0.0975
Operation	0.0115	0.0115
Construction	2.09	2.20
Interim storage	0.0258	0.0258
Long-term storage	0.0620	0.0666
Decommissioning	0.106	0.112
Transportation	0.0111	0.0111
Total	4.17	24.12

1.2.3 **เปรียบเทียบผลการคำนวณกับงานวิจัยอื่น**

Lenzen (2008) ได้รวบรวมงานวิจัยที่มีการนำเสนอผลกระทบจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยีในยุคที่ 2 (PWR, BWR, LWR และ HWR) จำนวน 16 แหล่งอ้างอิง (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข) พบว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์มีช่วงค่อนข้างกว้าง แสดงดังรูปที่ 1.4 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ (เส้นกราฟสีฟ้า) จะเห็นว่า ผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงและอยู่ในช่วงค่ารายงานผลของงานวิจัยอ้างอิงดังกล่าว



รูปที่ 1.4 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละขั้นตอนจากผลการคำนวณกับงานวิจัยอื่นๆ

1.3 สรุปผลการวิจัย

เทคโนโลยี EPR เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามากจากเทคโนโลยี PWR เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ขั้นตอน Construction และ ขั้นตอน Enrichment ด้วยวิธี Diffusion ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด ประมาณ 50% และ 40% จากปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด เนื่องมาจากมีการใช้พลังงานที่สูงเพื่อการผลิตและก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อนเป็นสิ่งที่ทุกคนให้ความสำคัญอย่างมาก ดังนั้นกระบวนการผลิตมุ่งเน้นการประหยัดพลังงาน ซึ่งวิธีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมจะหันไปใช้วิธีการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) กันมากขึ้น เนื่องจากใช้พลังงานลดลงเหลือเพียง 40-50 kWh/SWU ส่วนในกรณีการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทย ณ เวลาศึกษานี้ ยังไม่มีการเปิดเผยสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้าอย่างชัดเจน จึงสมมติให้วัตถุดิบทั้งหมดขนส่งมาจากต่างประเทศ ซึ่งปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากไม่ถึง 0.5% จากปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด และถ้าทราบสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จริงแล้ว อาจมีผลกระทบจากการขนส่งภายในประเทศเพิ่มขึ้น แต่คาดว่าน่าจะเป็นสัดส่วนที่น้อยมาก