บทที่ 2
การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของตัวแปรต่าง ๆ ภายใต้เทคโนโลยี EPR ABWR และ CANDU

2.1 บทนำ

เป็นที่รู้กันว่าพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และในปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ได้รับความนิยมมากในหลายประเทศเช่นสหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส แคนาดา และ จีน ถึงแม้ว่าแหล่งพลังงานนิวเคลียร์จะเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปไม่เหมือนกับพลังงานจากซากสิ่งมีชีวิตและพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ แต่ในระยะยาวพลังงานงานนิวเคลียร์น่าจะเป็นคำตอบหนึ่งที่ดีสำหรับประเทศทั่วโลกที่มีความกังวลเกี่ยวกับความยั่งยืนของแหล่งพลังงานและปัญหาภาวะโลกร้อน

อย่างไรก็ตามยังมีการถกเถียงกันถึงระดับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์กันอย่างกว้างขวาง Sovacool (2008) ได้รวบรวมงานวิจัยต่างๆ ซึ่งรายงานปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ พบว่าอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 288 gCO_2e/kWh โดยค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 66 gCO_2e/kWh ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวล แต่สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานลมและแสงอาทิตย์

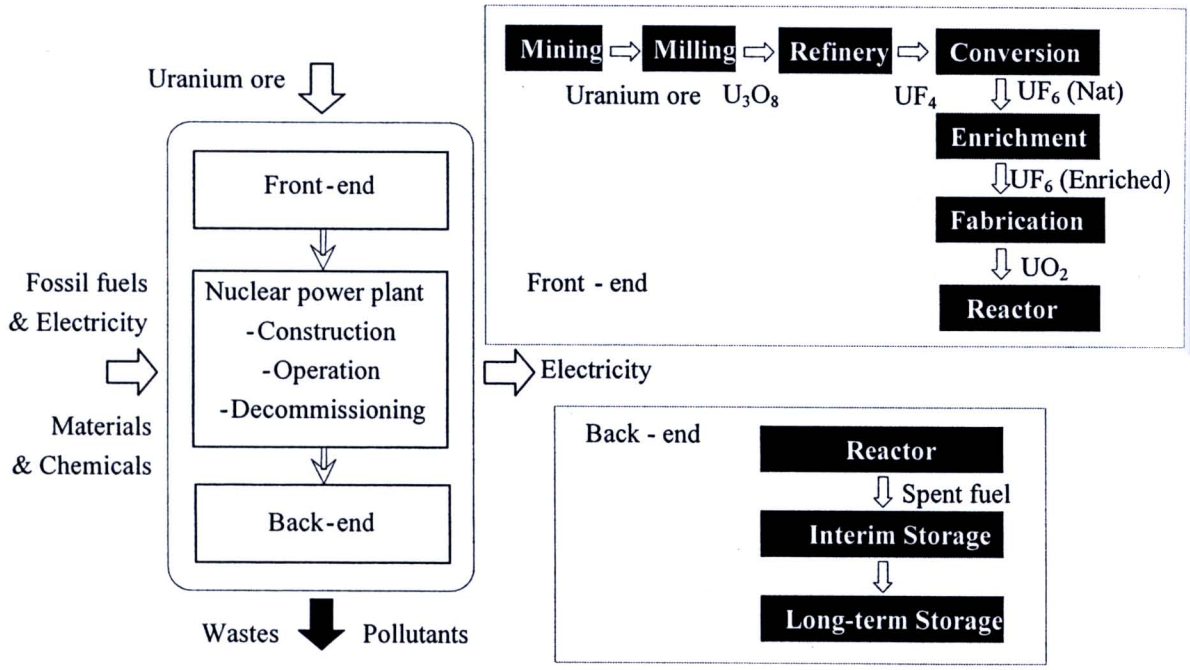
เทคโนโลยีนิวเคลียร์มีหลายชนิดด้วยกัน โดยแต่ละเทคโนโลยีมีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเทคโนโลยี Pressurized water reactor หรือ PWR เป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้กันมากที่สุดถึง 61% รองลงมาคือ Boiling water reactor หรือ BWR 21% และ Canadian deuterium uranium หรือ CANDU 10.4% (Nuclear Power Plants Information (Last up date 2010/09/06) ทั้งสามเทคโนโลยีนี้ต่างกันที่สารหล่อเย็น (Coolant)และสารกระตุ้น (Moderator) โดยที่ PWR ใช้น้ำธรรมดาที่อุณหภูมิสูง และความดันสูง และ BWR ใช้น้ำเดือดธรรมดา ส่วน CANDU ใช้น้ำมวลหนัก (D_2O) สิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนอีกประการคือความเข้มข้นของยูเรเนียม ซึ่งเทคโนโลยี PWR และ BWR แร่ยูเรเนียมธรรมชาติต้องผ่านกระบวนการเสริมสมรรถนะ (Enrichment)ให้มีความเข้มข้นของ U-235 เพิ่มขึ้นจาก 0.7% เป็น 3-5% U-235 ในขณะที่ CANDU สามารถใช้แร่ยูเรเนียมธรรมชาติได้โดยตรง (Hardy, C.J., 2008; Vuono and Lee, 2009) ในปัจจุบันเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้มีการพัฒนาเข้าสู่ยุคที่ 3 โดยมุ่งเน้นให้มีความปลอดภัยสูงสุด รวมทั้งเสริมศักยภาพการดำเนินงาน เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการ Burn- up ของเชื้อเพลิง ค่า Capacity factor และ อายุของโรงไฟฟ้า (Life time)ที่ยาวนานขึ้น เป็นต้น (World Nuclear Association. http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html) เทคโนโลยี PWR ได้พัฒนาเป็น European pressurized reactor หรือ EPR เทคโนโลยี BWR พัฒนาเป็น Advanced boiling

water reactor หรือ ABWR และ CANDU พัฒนาเป็น Enhanced CANDU-6 หรือเรียกสั้นๆ ว่า CANDU เทคโนโลยีในยุคที่ 3 การประเมินผลกระทบจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ยังไม่มีการวิจัย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีมีวัตถุประสงค์หลักในการประเมินผลกระทบจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากทั้งสามเทคโนโลยีในยุคที่ 3 นี้

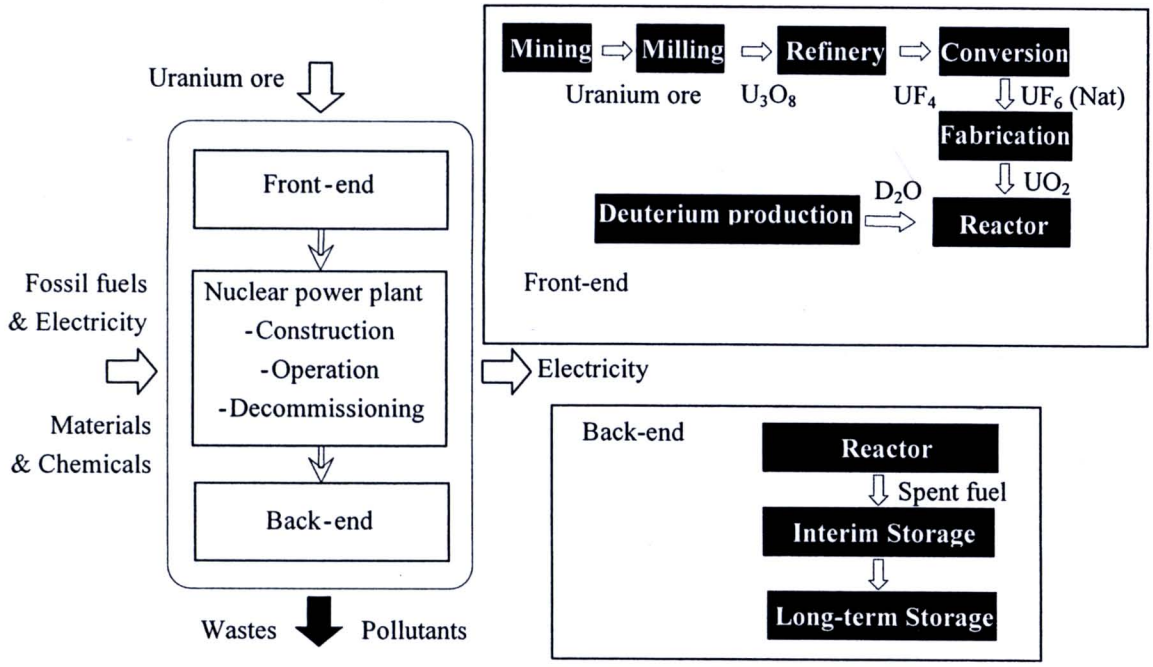
2.2 ขอบเขตการประเมิน

ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมาจากเทคโนโลยีนิวเคลียร์ทั้งสามแบบถูกพิจารณาบนพื้นฐานการผลิตกระแสไฟฟ้า 1 kWh โดยขอบเขตของระบบในแต่ละกรณีแสดงดังรูปที่ 2.1; รูปที่ 2.1 (ก) แสดงขอบเขตของเทคโนโลยี EPR และ ABWR และรูปที่ 2.1 (ข) แสดงขอบเขตของเทคโนโลยี CANDU ซึ่งมีความแตกต่างกันที่เทคโนโลยี EPR และ ABWR มีขั้นตอนการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม แต่เทคโนโลยี CANDU มีขั้นตอนการผลิตน้ำมวลหนัก

(ก) EPR และ ABWR



(ข) CANDU



รูปที่ 2.1 ขอบเขตของระบบ (ก) เทคโนโลยี EPR and ABWR และ (ข) เทคโนโลยี CANDU

2.3 สมมติฐานและตัวแปรที่ยืดหยุ่น

สมมติฐานที่ใช้ในการประเมินผลกระทบการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีดังนี้

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 และ 1 ถึง

60 เมื่อทำเหมืองแบบ Open pit พลังงานที่ใช้ในการทำเหมืองอาศัยพลังงานจากลังงานไฟฟ้า และการเผาไหม้ของดีเซล ซึ่งการทำเหมืองแบบ underground ใช้พลังงาน 70.6 kWh/ton ore และ 57.7 MJ diesel/ton ore ส่วนการทำเหมืองแบบ open pit ใช้พลังงาน 2.68 kWh/ton ore และ 407 MJ diesel/ton ore and (WISE) ตามลำดับ การคำนวณกำหนดให้ระบบที่ศึกษาใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมจากการทำเหมืองแบบ open pit และ underground อย่างละ 50% โดยพลังงานไฟฟ้าและดีเซลที่ใช้ต่อถ่านหินหนึ่งตันมีค่า 5.91 kWh/ton rock และ 9.12 MJ diesel/ton rock

3. ปริมาณสารเคมี กรดไนตริก (HNO_3) แอมโมเนีย (NH_3) และกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่ใช้ในขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ (Refinery) คำนวณมาจากปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry):

$$2U_3O_8 + 16HNO_3 \rightarrow 6UO_2(NO_3)_2 + 4NO_2 + 8H_2O$$
$$6UO_2(NO_3)_2 + 26NH_3 \rightarrow 3(NH_4)2U_2O_7 + 27H_2O + 16N_2$$
$$3(NH_4)2U_2O_7 + 18O_2 \rightarrow 6UO_3 + 12H_2O + 6NO$$
$$6UO_3 + 6H_2 \rightarrow 6UO_2 + 6H_2O$$
$$6UO_2 + 24HF \rightarrow 6UF_4 + 12H_2O$$

และปริมาณกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และ แอมโมเนีย (NH_3) ในขั้นตอนการสกัดยูเรเนียม (Milling) ได้มาจาก Mudd and Diesendorf (2008)

4. ขนาดโรงไฟฟ้า คือ EPR 1,630 MW, ABWR 1,365 MW และ CANDU 740 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) เท่ากับปริมาณเชื่อเพลิงสายป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 18,950 kg/m^3 (Emsley,1999)

5. พิจารณาเฉพาะการขนส่งจากต่างประเทศเท่านั้น ส่วนการขนส่งภายในประเทศยังไม่นำมาคิด
6. การก่อสร้างโรงไฟฟ้าเกิดขึ้นในประเทศไทย แต่ยังไม่ระบุพื้นที่แน่ชัด จึงไม่คิดผลกระทบจากการขนส่งภายในประเทศ จากการประเมินความอ่อนไหวตามสมมติฐานนี้แสดงให้เห็นว่าการขนส่งภายในประเทศมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณทั้งหมดตลอดทั้งวัฏจักร

7. ผลกระทบจากการก่อสร้างโรงไฟฟ้าในส่วนของวัสดุก่อสร้างคิดเฉพาะวัสดุที่ใช้ในปริมาณมากคือ คอนกรีต และเหล็ก โดยกำหนดให้คอนกรีตที่ใช้เป็นชนิดที่มีความหนาแน่นสูง 3,630 kg/m^3 (Mukherjee,1992) และสมมติให้คอนกรีตทั้งหมดผลิตภายในประเทศ และนำเข้าเหล็กทั้งหมดจากประเทศญี่ปุ่น ปริมาณคอนกรีตและเหล็กทั้งหมดของเทคโนโลยี EPR ABWR และ CANDU ได้ข้อมูลมาจาก Areva[1], Hitachi[1] and Andesta (1998) ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณคอนกรีตและเหล็กสำหรับก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

เทคโนโลยี	**ปริมาณคอนกรีต (ตัน)**	**ปริมาณเหล็ก (ตัน)**
EPR	1,089,000	130,020
ABWR	726,000	70,000
CANDU	295,177[a]	28,761[a]

[a] เฉลี่ยจากงานวิจัยของ Andesta (1998)

8. สมมติฐานอื่นๆ
    - แหล่งเชื้อเพลิงยูเรเนียมได้มาจากประเทศแคนาดาที่มีการทำเหมืองแบบ open pit และ underground อย่างละ 50:50 (โดยน้ำหนัก)
    - กระบวนการ ทำเหมือง (Mining) และ การสกัดยูเรเนียม (Milling) ดำเนินการในประเทศแคนาดา
    - แร่ยูเรเนียมถูกขนส่งทางเรือจากประเทศแคนาดาเข้าประเทศฝรั่งเศส เพื่อผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Refinery), การแปรสภาพ (Conversion), การเสริมสมรรถนะ (Enrichment) (EPR และ ABWR) และขั้นตอนสุดท้ายคือ การขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง (Fuel fabrication)
    - แท่งเชื้อเพลิงถูกขนส่งทางเรือจากประเทศฝรั่งเศสเข้าสู่ประเทศไทย
    - สำหรับเทคโนโลยี CANDU แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียมถูกขนส่งมาจากประเทศแคนาดาสู่ประเทศไทยโดยตรง
    - น้ำมวลหนักถูกผลิตขึ้นในประเทศแคนาดา และถูกขนส่งทางเรือเข้าประเทศไทย

2.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรต่างๆ ต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก แบ่งเป็น Scenarios ที่แตกต่างกันในแต่ละเทคโนโลยี แสดงดังตารางที่ 2.2 ประกอบด้วย 8 ตัวแปรที่ทำการศึกษา โดยมี 2 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อขั้นตอน Mining และ Milling คือ Waste to Ore ratio และ เกรดแร่ (Ore grade) มี 2 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อขั้นตอน Enrichment คือ U-235 concentration และ electricity consumption มี 2 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อขั้นตอนการดำเนินการ (Power plant) คือ Burn-up rate และ Thermal efficiency และ 2 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อขั้นตอนการก่อสร้าง (construction) และขั้นตอนของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหลัง (Back-end) คือ Capacity factor และ อายุของโรงไฟฟ้า (Life time) โดยที่ผลการคำนวณที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับสภาวะ Baseline ทั่วไปที่ถูกกำหนดขึ้นมา แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ช่วงตัวแปรที่ทำการศึกษาแต่ละ Scenarios ที่แตกต่างกัน

Parameter	Unit	EPR	ABWR	CANDU	References
Power plant Capacity	MW	1,630†	1,356‡	740¤	†Areva[1]; ‡Hitachi[2]; ¤Vuono and Lee (2009)
Waste to ore	-	1-60	1-60	1-60	WISE
Ore grade	% U_3O_8	†0.014-12.5‡	†0.014-12.5‡	†0.014-12.5‡	†Mudd and Diesendorf (2008), ‡IAEA
%U-235 in U-Enriched	% U-235	†3.7-5‡	¤3.2-3.7†	-	†Done (1996); ‡Areva[4]; ¤ANSN
Energy for Enrichment	kWh/SWU	40-50*, 2,400**	40-50*, 2,400**	-	Done (1996) * Centriugal Enrichment and ** Diffusion Enrichment
Burn-up rate	GWd/tU	‡55-70†	¤32-45‡	7.29-7.5¤¤	‡Done (1996); †Areva[4]; ¤ANSN; ¤¤Rouben
Thermal efficiency	%	†33-37‡	†33-37.2¤	30-31¤¤	†Done (1996); ‡Areva[3]; ¤GE; ¤¤Andesta (1998)
Capacity factor	%	‡87-94†	86-87‡	84.4-90¤	‡Done (1996); †Areva[4]; ¤ Song (1995); ¤Vuono and Lee (2009)
Life time	year	40-60†	40-60‡	40-60¤	†Areva[3]; ‡Hitachi[2]; ¤Vuono and Lee (2009)

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรสำหรับการคำนวณ Baseline

Process	Parameters	EPR	ABWR	CANDU	Unit	References
Mining	-Waste/Ore Ratio	1	1	1		WISE
	-Natural uranium assay	0.71	0.71	0.71	%U-235	Vuono and Lee (2009)
	- Ore grade	0.21	0.21	0.21	$\%U_3O_8$	IAEA
	-Waste rock grade	0.03	0.03	0.03	% U_3O_8	CAMECO Mine
	-Diesel consumption*	9.12	9.12	9.12	MJ/t Rock	Own calculation
	-Electricity* consumption	5.91	5.91	5.91	kWh/t Rock	Own calculation
Milling	-Extraction Losses	1.6	1.6	1.6	%	CAMECO Mine
	-Diesel consumption**	483	483	483	MJ/t Ore	WISE
	-Electricity** consumption	18.6	18.6	18.6	kWh/t Ore	WISE
Refinery	-Losses	1	1	1	%	Assumption
Conversion	-Losses	1	1	1	%	Assumption
Enrichment	-Enriched uranium	3.7	3.2	-	%U-235	Done (1996); ANSN
	-Tails Assay	0.3	0.3	-	%U-235	Faghihi (2008)
	- Specific Electricity Consumption[a]	50	50	-	kWh/SWU	Done (1996)
Fuel Fabrication	-Losses	1	1	-	%	Assumption

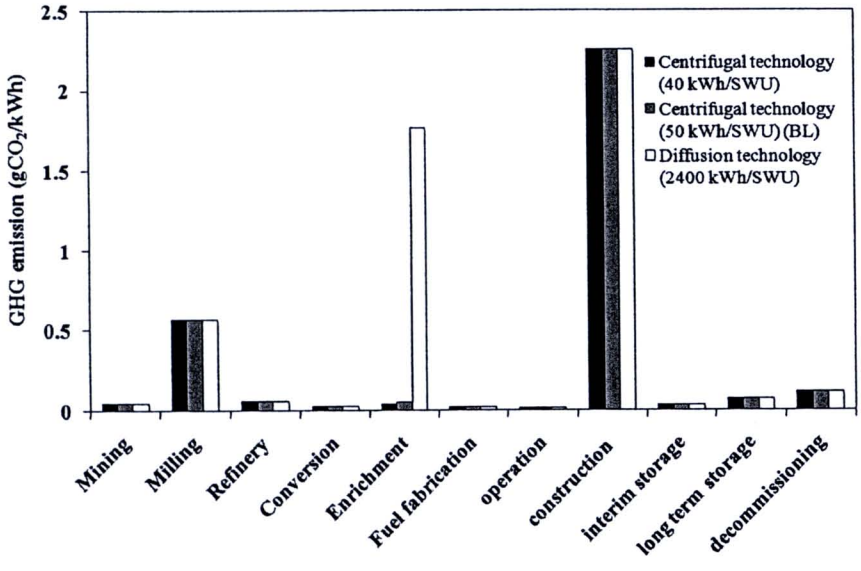
ตารางที่ 2.3 ตัวแปรสำหรับการคำนวณ Baseline (ต่อ)

Process	Parameters	EPR	ABWR	CANDU	Unit	References
Power Plant	-Fuel Burn up	60‡	32▫	7.29▫▫	GWd/tU	‡Done (1996); ▫ANSN; ▫▫Rouben
	-Efficiency	33‡	33‡	30▫▫	%	‡Done (1996); ▫▫Andesta (1998)
	-Capacity factor	87‡	86‡	84.4▫	%	‡Done (1996); ▫Vuono and Lee (2009)
	-Net Capacity	1,630‡	1,356▫	740▫▫	MW	‡Areva[1]; ▫Hitachi[2]; ▫▫Vuono and Lee (2009)
	- Life time	60‡	60▫	60▫▫	Year	‡Areva[3]; ▫Hitachi[2]; ▫▫Vuono and Lee (2009)
Construction	- Electricity	245,650,593	245,650,593	245,650,593	kWh/plant	Own calculation
	- Thermal energy	9,976,908	9,976,908	9,976,908	GJ/plant	Own calculation
Long-term storage	-Water	1,514	1,514	1,514	m^3/plant	ISA (2006)
	-Electricity	167,000	167,000	167,000	kWh/year	ISA (2006)
	-Thermal energy	6,480,000	6,480,000	6,480,000	MJ/year	ISA (2006)
Decommissioning	- Electricity	12,828,144	12,828,144	12,828,144	kWh/year	Own calculation
	-Thermal energy	923,818	923,818	923,818	MJ/year	Own calculation
Heavy water production	- Total volume of D_2O			470	m^3	Vuono and Lee (2009)
	- D_2O loss per year			3,970	kg/year	Song (1995)
	- Electricity			1.12	MWh/kgD_2O	Own calculation
	-Thermal energy			13,470	MJ/kgD_2O	Own calculation

2.4.1 ผลการศึกษาความอ่อนไหวของตัวแปรภายใต้เทคโนโลยี EPR

2.4.1.1 ผลการประเมินในกรณี Base line

กรณี Base line แบ่งออกเป็น 2 scenarios คือ กระบวนการ Enrichment ต่างกันระหว่าง วิธีการแพร่ผ่าน (Diffusion) ซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิม และวิธีการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ซึ่งในปัจจุบันได้รับความนิยมมากกว่า จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าวิธีการ Diffusion ทำให้ยูเรเนียมมีความเข้มข้นสูงขึ้นมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน Enrichment มากกว่า 30 เท่า เมื่อเทียบกับวิธีการ Centrifuge สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก วิธีการ Diffusion ใช้พลังงานมากกว่าถึง 2400 kWh/SWU ในขณะที่วิธีการ Centrifuge ใช้พลังงานเพียง 40-50 kWh/SWU (Done,1996) อย่างไรก็ตามวิธีการ Centrifuge ซึ่งใช้พลังงาน 40-50 kWh/SWU ไม่มีความแตกต่างกันในการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด แต่จะเห็นว่าขั้นตอน Construction เป็นขั้นตอนที่มีอิทธิพลค่อนข้างมากซึ่งจะอธิบายต่อไป จากการที่งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเทคโนโลยีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในยุคที่ 3 ซึ่งให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการแสดงผลการศึกษาต่อไปจะตั้งอยู่บนสมมติฐานการ Enrichment ยูเรเนียมด้วยวิธีการ Centrifuge ทั้งหมด โดยใช้พลังงานการแยก 50 kWh/SWU ที่สภาวะ Base line มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด 3.24 gCO_2e/kWh

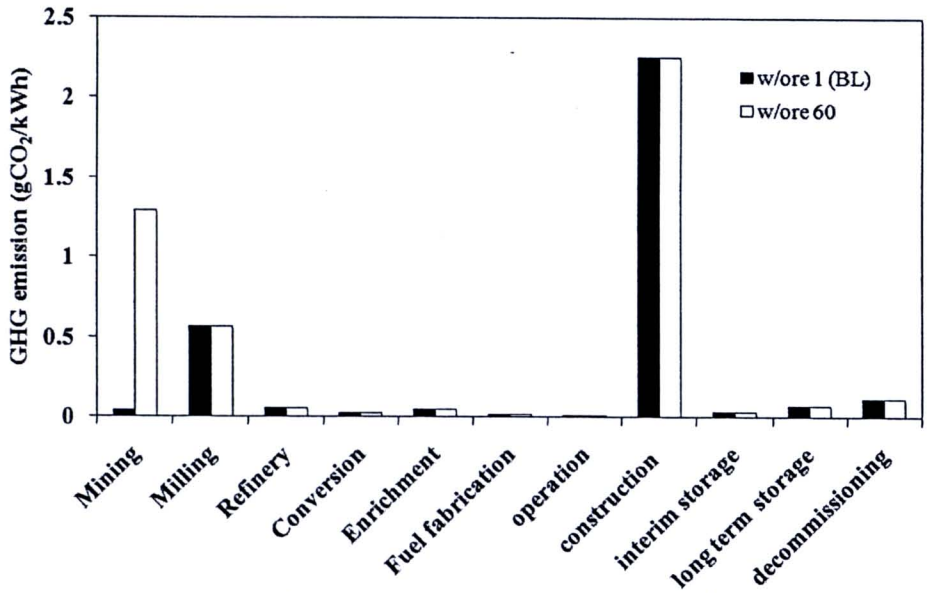


รูปที่ 2.2 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากกรณี Base line ที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี EPR เมื่อวิธี Enrichment ต่างกัน (BL = Base line)

2.4.1.2 **ผลการประเมินความอ่อนไหวของตัวแปรต่างๆ**

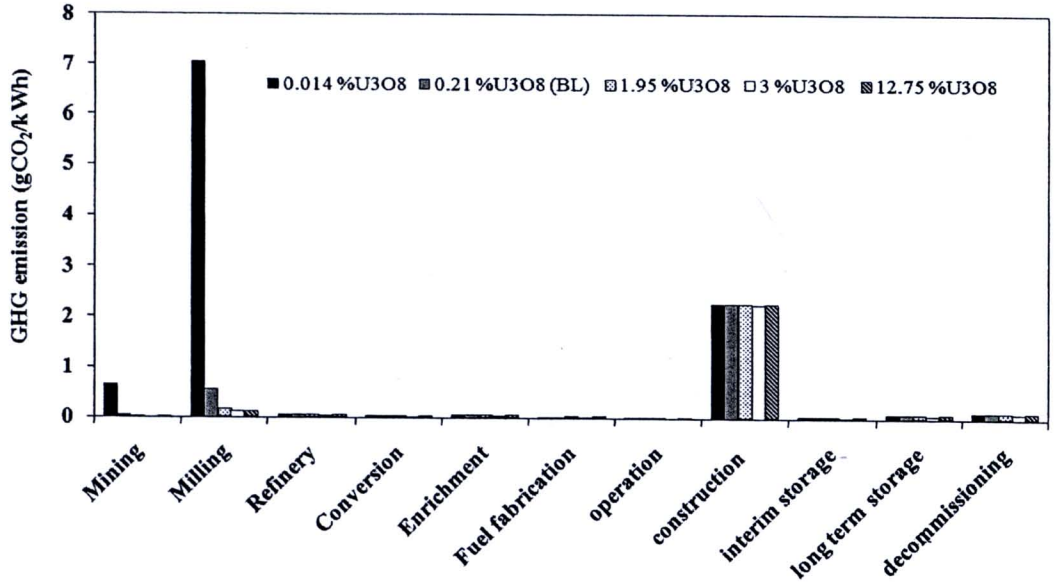
- ขั้นตอน Mining และ Milling

ตัวแปรหลักที่มีผลต่อระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนนี้คือ Waste to Ore ratio (W/O) ซึ่งจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ 1 ถึง 60 โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของแร่และวิธีการทำเหมือง เช่น การทำเหมืองแบบ Underground หรือ Open pit ผลปรากฏว่า ในขั้นตอน Mining ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีปริมาณแตกต่างกันจาก 0.042 gCO_2e/kWh ที่ W/O เท่ากับ 1 ถึง 1.29 gCO_2e/kWh ที่ W/O เท่ากับ 60 (รูปที่ 2.3) อย่างไรก็ตามผลกระทบของการ W/O เกิดขึ้นเฉพาะในขั้นตอน Mining เนื่องจากการทำเหมืองที่มีสัดส่วนของเสียสูง จะต้องการพลังงานสูงกว่าเพื่อผลิตแร่ให้มีปริมาณเท่ากัน



รูปที่ 2.3 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี EPR เมื่อ Waste to ore ratio ต่างกัน

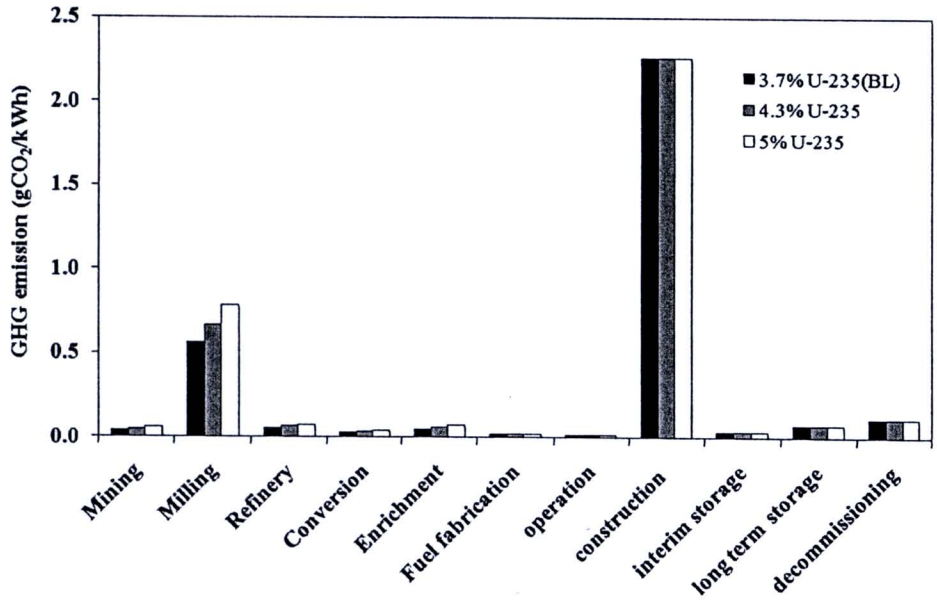
Ore grade แสดงถึงความเข้มข้นของ U_3O_8 ที่มีอยู่ในแร่ที่ขุดได้ ซึ่งช่วงความเข้มข้นของU_3O_8 ค่อนข้างกว้าง จากความเข้มข้นต่ำเพียง 0.014 จนสูงถึง 12.75% U_3O_8 (Mudd และ Diesendorf, 2008; IAEA Workshop Salvador / BA, Brasil, 2008) อิทธิพลของ Ore grade มีผลต่อขั้นตอน Mining และ Milling จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่า ถ้าผลิตเชื้อเพลิงยูเรเนียมจากแร่เกรดต่ำๆ เช่น U_3O_8 เข้มข้น 0.014% จะทำให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน Milling เพิ่มขึ้นถึง 7.04 gCO_2e/kWh แต่ถ้าใช้เกรดแร่ดีที่สุด (12.75%) ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ที่ 0.11 gCO_2e/kWh



รูปที่ 2.4 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี EPR เมื่อ Ore grade ต่างกัน

- ขั้นตอน Enrichment

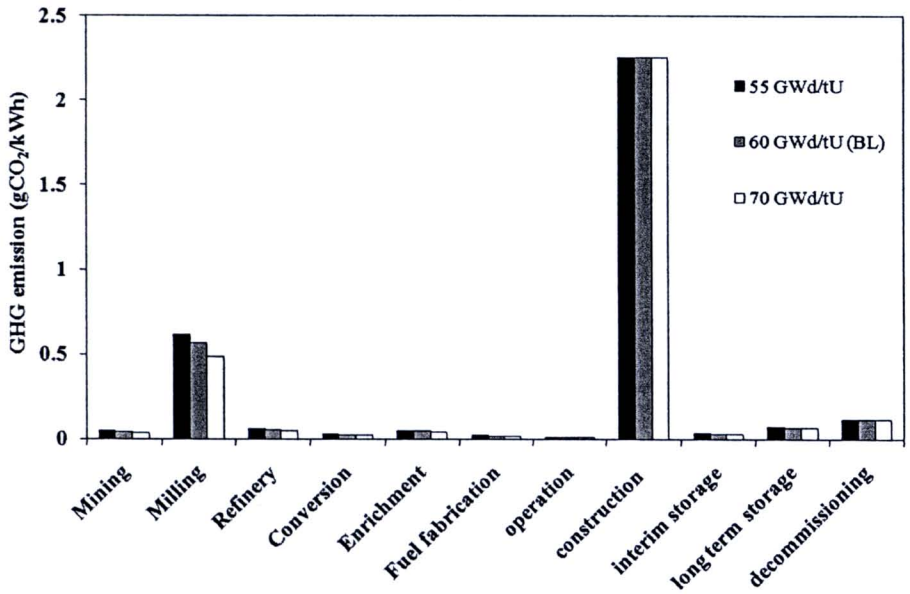
กระบวนการ Enrichment ด้วยวิธีการ Centrifuge เพื่อเพิ่มความเข้มข้น U-235 จาก 3.7 ถึง 5% U – 235 จำเป็นต้องอาศัยพลังงานปริมาณมาก และต้องใช้ปริมาณยูเรเนียมธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นจาก 1.82×10^{-8} เป็น 2.52×10^{-8} tU / kWh ทำให้มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นตั้งแต่ขั้นตอน Mining ถึงขั้นตอน Enrichment (รูปที่ 2.5) อย่างไรก็ตามปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากขั้นตอน Enrichment มีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด



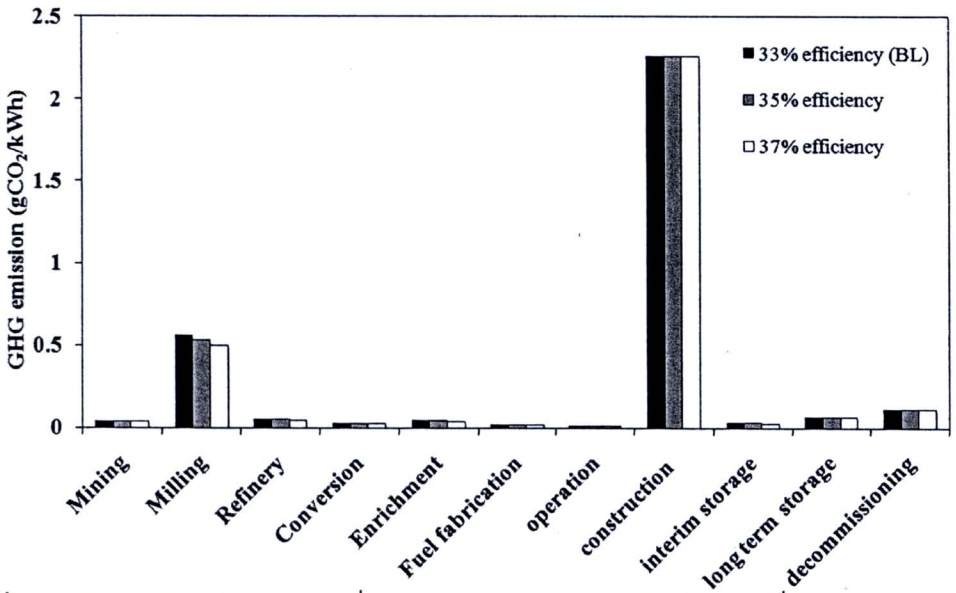
รูปที่ 2.5 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี EPR เมื่อความเข้มข้น U-235 ต่างกัน

- **ขั้นตอน** Operation

มีหลายตัวแปรที่มีผลต่อระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนนี้ คือ Burn-up rate, Thermal efficiency, Capacity factor และ Life time โดยทั่วไปค่า Burn-up rate ของเทคโนโลยี EPR อยู่ในช่วง 55-70 GWd/tU แสดงให้เห็นว่ามีความต้องการเชื้อเพลิงยูเรเนียมในขั้นตอนผลิตกระแสไฟฟ้าลดลงจาก 0.23×10^{-8} เป็น 0.18×10^{-8} tU/kWh จึงส่งผลให้ขั้นตอนในวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหน้า (Front-end) มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงแต่ไม่มากเท่าที่ควร (รูปที่ 2.6) ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มค่า Thermal efficiency จาก 33 ถึง 37% สามารถช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพียงเล็กน้อยเช่นกัน (รูปที่ 2.7)

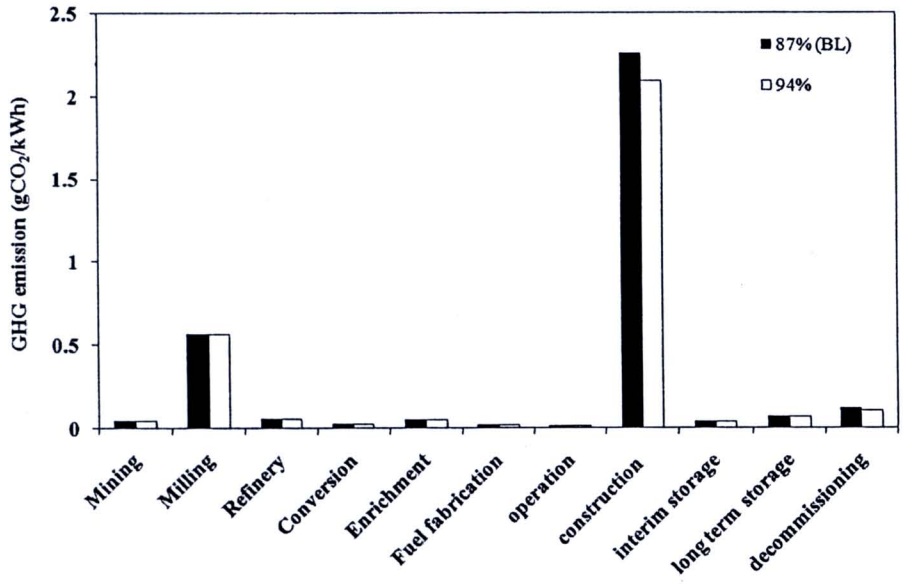


รูปที่ 2.6 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี EPR เมื่อ Burn-up rate ต่างกัน

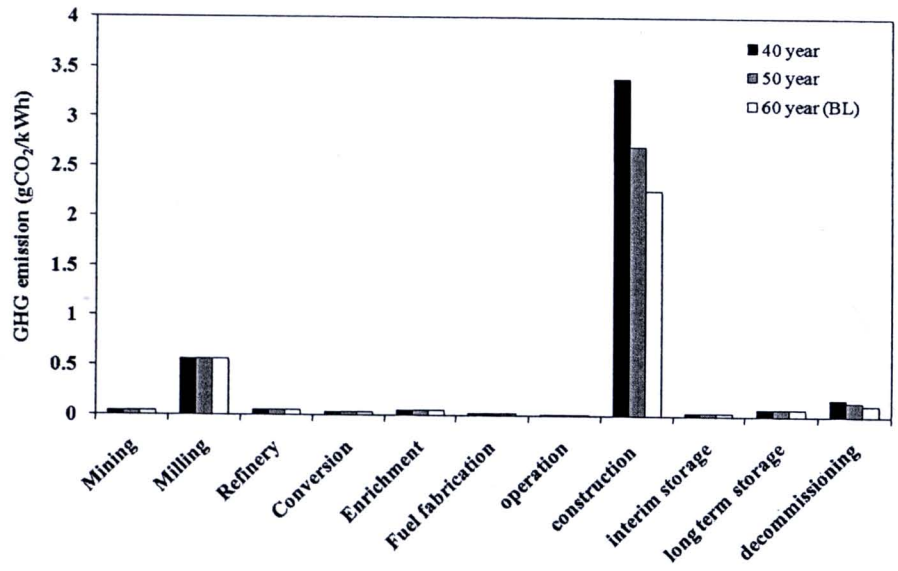


รูปที่ 2.7 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี EPR เมื่อ Thermal efficiency ต่างกัน

สภาพแวดล้อมของโรงไฟฟ้าอาจมีการดำเนินการที่ Capacity factor และ Life time ที่แตกต่างกัน ในการประเมินผลนี้ สมมติว่า Capacity factor ไม่มีผลต่อ Life time ของโรงไฟฟ้า ทั้งสองตัวแปรนี้ส่งผลกระทบสำคัญต่อปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากขั้นตอน Construction ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอน Construction จะถูกปันส่วนตลอดทั้งช่วงชีวิตของโรงไฟฟ้า เมื่อค่า Capacity factor และ Life time มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหมายความว่า ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอน Construction จะถูกปันส่วนตลอดความแตกต่างของช่วงเวลา หรือพลังงานที่ผลิตได้ทั้งหมดจากโรงไฟฟ้า หรืออีกนัยหนึ่ง ถ้า Capacity factor มีค่าสูงขึ้น และ Life time ของโรงไฟฟ้ายาวนานขึ้น การปันส่วนของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน Construction จะลดลง จากรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าที่มี Capacity factor 94% ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอน Construction น้อยกว่า การดำเนินการที่ Capacity factor 87% และยังช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเล็กน้อยในขั้นตอนการกำจัดกาก (Interim storage และ Long term storage) จนถึงขั้นตอนการรื้อถอน (Decommissioning) จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่า การปันส่วนปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน Construction จนถึงขั้นตอน Decommissioningมีปริมาณลดลง เมื่อ Life time ของโรงไฟฟ้ายาวนานขึ้น



รูปที่ 2.8 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี EPR เมื่อCapacity factor ต่างกัน



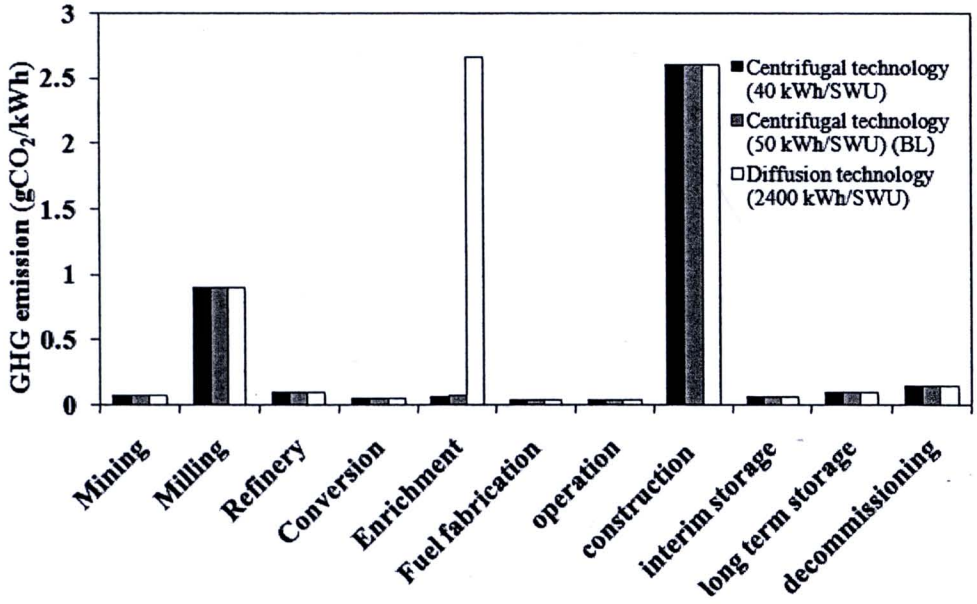
รูปที่ 2.9 *ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี EPR เมื่อ Life time ต่างกัน*

นอกจากนี้ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลของเครื่อง Diesel generator สำหรับ back up เมื่อเกิดเหตุขัดข้อง มีปริมาณน้อยกว่า 0.5% จากปริมาณทั้งหมด จึงละทิ้งจากการประเมินผลกระทบของงานวิจัยนี้

2.4.2 ผลการศึกษาความอ่อนไหวของตัวแปรภายใต้เทคโนโลยี ABWR

2.4.2.1 ผลการประเมินในกรณี Base line

กรณี Base line แบ่งออกเป็น 2 scenarios เช่นเดียวกับ EPR คือกระบวนการ Enrichment ต่างกันระหว่าง วิธีการ Diffusion และวิธีการ Centrifuge จากรูปที่2.10 ถ้าขั้นตอน Enrichment ใช้วิธีการ Diffusion (2400 kWh/SWU) จะทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 2.66gCO_2e/kWh แต่ถ้าใช้วิธีการ Centrifuge (40-50 kWh/SWU) จะปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงเป็นอย่างมากเหลือเพียง 0.060 ถึง0.072 gCO_2e/kWh เนื่องมาจากพลังงานที่ใช้เพื่อเพิ่มความเข้มข้น U-235 ต่อหนึ่ง SWU น้อยกว่าประมาณ 40 เท่า ซึ่งการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในปัจจุบันและอนาคตมุ่งเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานและลดสภาวะการเกิดโลกร้อน ดังนั้นการคำนวณต่อไปจึงกำหนดให้เสริมสมรรถนะยูเรเนียมด้วยวิธีการ Centrifuge และพลังงานที่ใช้ในการแยก 50 kWh/SWU โดยมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดทั้งวัฏจักรอยู่ที่ประมาณ 4.15 gCO_2e/kWh และเป็นที่หน้าสังเกตว่าถ้าขั้นตอน Enrichment โดยใช้วิธีการ Diffusion จะมีอิทธิพลเด่นชัดมากกว่าขั้นตอน Construction เนื่องจากผลกระทบของการใช้พลังงานนั่นเอง

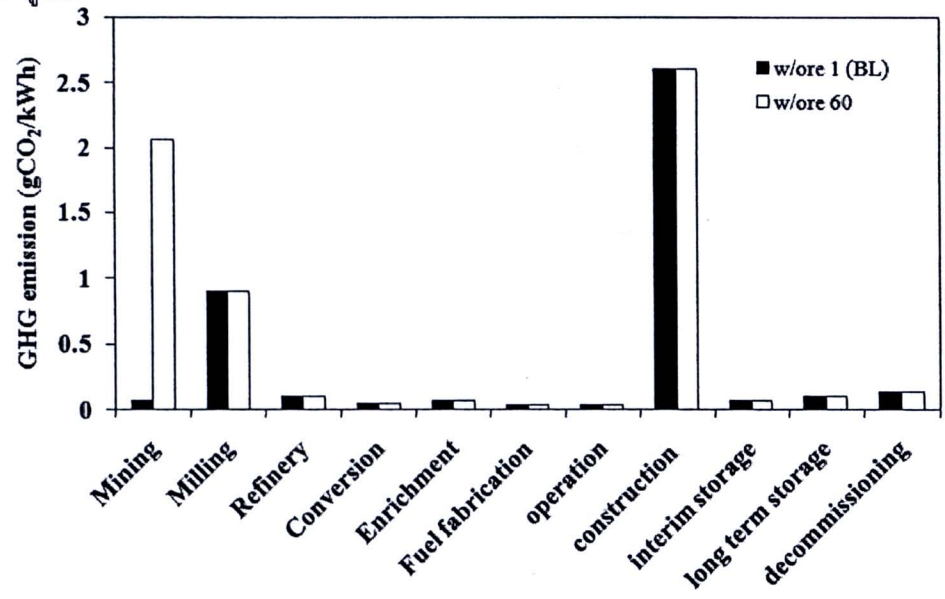


รูปที่ 2.10 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากกรณี Base line ที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อวิธี Enrichment ต่างกัน (BL = Base line)

2.4.2.2 ผลการประเมินความอ่อนไหวของตัวแปรต่าง ๆ

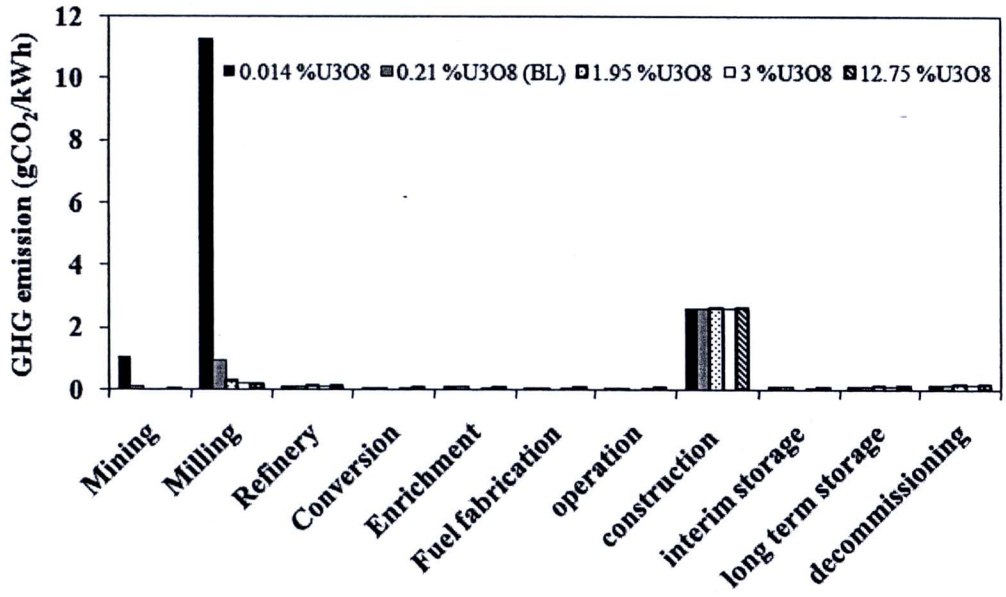
- ขั้นตอน Mining **และ** Milling

สัดส่วน Waste to Ore ratio (W/O) ที่แตกต่างกันในช่วงตั้งแต่ 1 ถึง 60 มีอิทธิพลอย่างมากในขั้นตอน Mining ซึ่งปริมาณก๊าซเรือนกระจกมีการปลดปล่อยเพิ่มขึ้นจาก 0.068-2.07 gCO_2e/kWh (รูปที่ 2.11) เนื่องจากต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เพื่อให้เหมืองที่มี W/O ต่ำสามารถผลิตแร่ในปริมาณเท่ากับเหมืองที่มี W/O สูงได้



รูปที่ 2.11 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อ Waste to ore ratio ต่างกัน

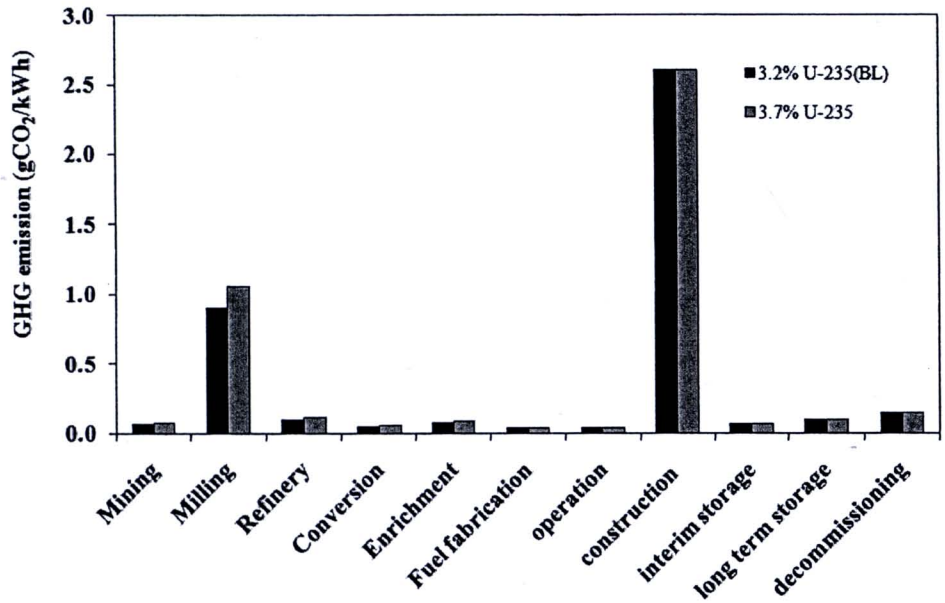
Ore grade เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ ถ้าแหล่งเชื้อเพลิงยูเรเนียมมาจากบริเวณที่มีความเข้มข้นของ U_3O_8 ต่ำจะทำให้ใช้ปริมาณแร่มากขึ้น และใช้พลังงานสูงขึ้นเพื่อให้ได้ปริมาณแร่ที่ต้องการ จากรูปที่2.12 ขั้นตอน Milling ได้รับอิทธิพลเด่นชัดจากผลกระทบของ Ore grade จะเห็นว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกมีปริมาณแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญคือ 0.174 ถึง 11.3 gCO_2e/kWh ในช่วงความเข้มข้นของ U_3O_8ต่ำที่สุดถึงสูงที่สุด อยู่ในช่วง 0.014 ถึง 12.75% U_3O_8 ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อ Ore grade ต่างกัน

- **ขั้นตอน** Enrichment

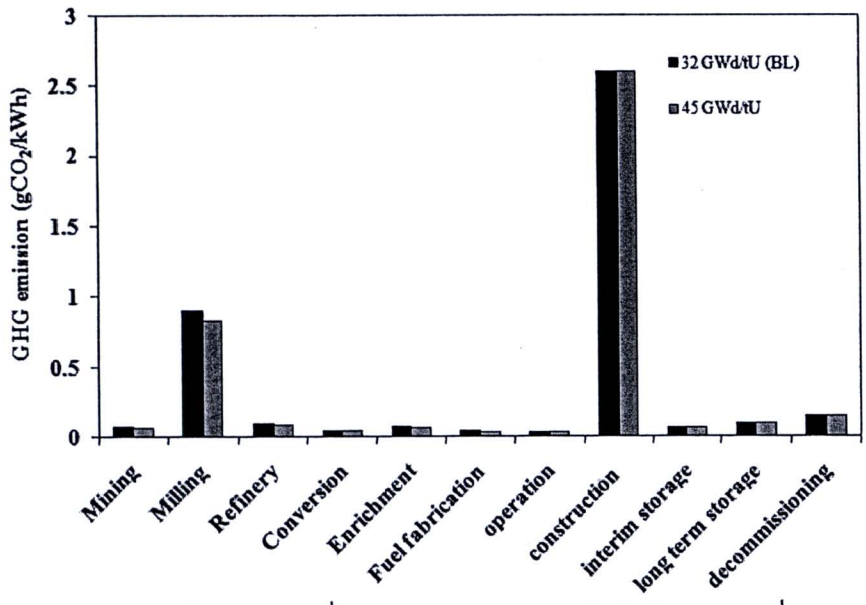
เทคโนโลยี ABWR มีความต้องการเชื้อเพลิงยูเรเนียมในช่วงความเข้มข้น 3.2-3.7 % U – 235 (ANSN; Done, 1996) ซึ่งต้องใช้ปริมาณยูเรเนียมธรรมชาติในขั้นตอน Mining เพิ่มขึ้นจาก $2.92x10^{-8}$ เป็น $3.43\ x10^{-8}$ tU / kWh จึงมีผลกระทบต่อปริมาณก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องถึงขั้นตอน Enrichment (รูปที่ 2.13) และจะเห็นได้ว่าความแตกต่างปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนส่วนหน้าของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ไม่แตกต่างกันมากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ U – 235 เนื่องจากช่วงความเข้มข้นดังกล่าวต่างกันเพียงเล็กน้อย



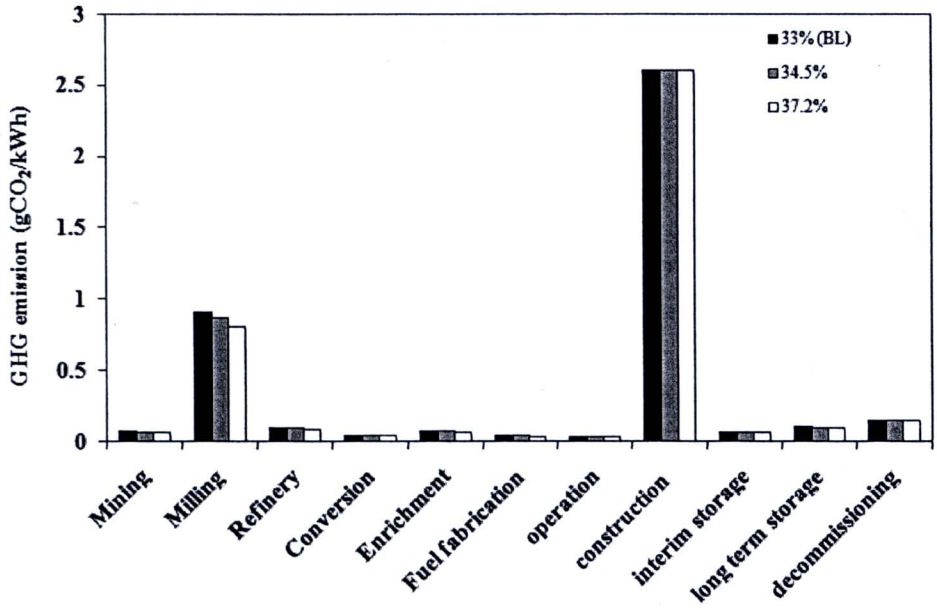
รูปที่ 2.13 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อความเข้มข้น U-235 ต่างกัน

- ขั้นตอน Operation

จากข้อมูลค่า Burn-up rate ของเทคโนโลยี ABWR อยู่ในช่วง 32-45 GWd/tU ส่งผลให้ขั้นตอนการดำเนินการผลิตกระแสไฟฟ้ามีต้องการปริมาณเชื้อเพลิงยูเรเนียมลดลงจาก 0.39×10^{-8} เป็น 0.36×10^{-8} tU / kWh เนื่องจากค่า Burn-up rate มีช่วงแคบทำให้ความแตกต่างปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนส่วนหน้าของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จึงลดลงไม่มากนัก (รูปที่2.14) เช่นเดียวกับการเพิ่มค่า Thermal efficiency จาก 33 ถึง 37.2% สามารถช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพียงเล็กน้อยเช่นกัน (รูปที่ 2.15)



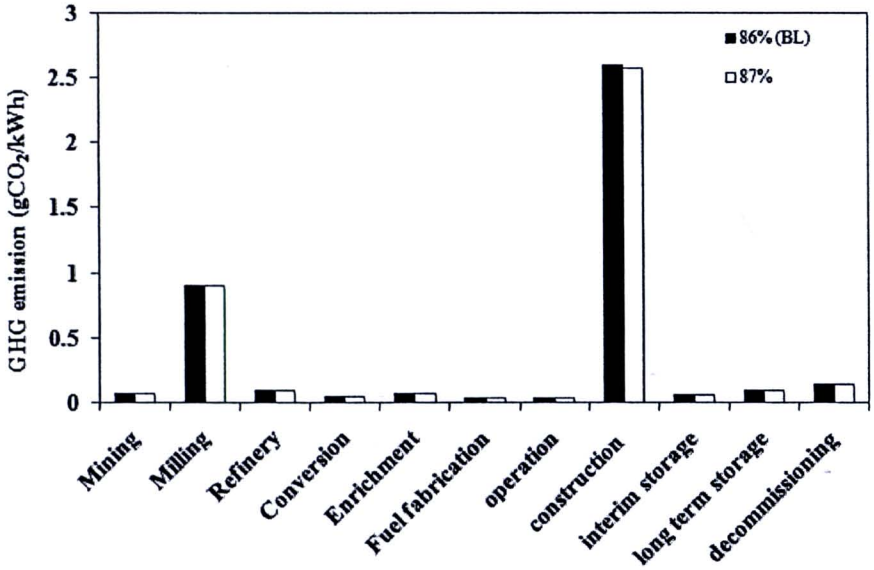
รูปที่ 2.14 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อ Burn-up rate ต่างกัน



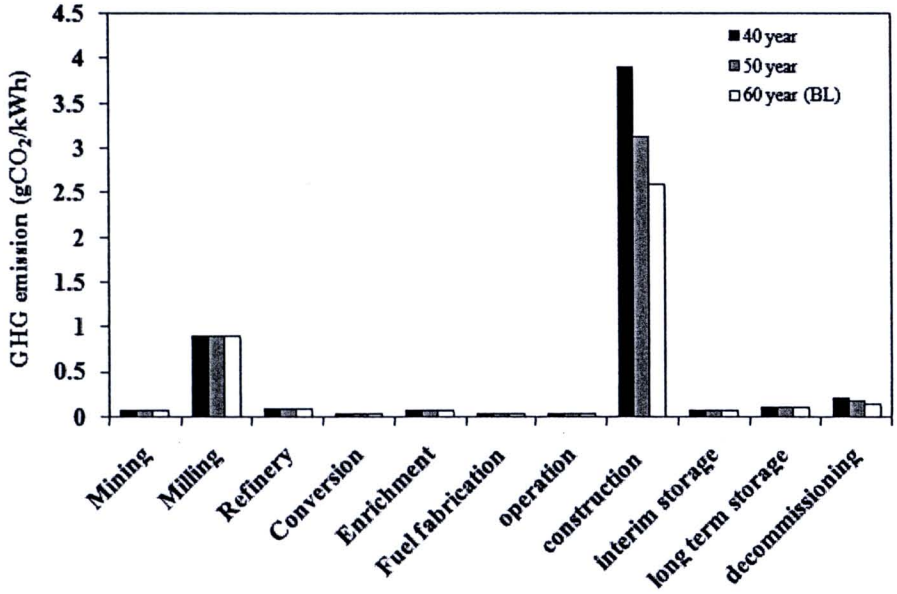
รูปที่ 2.15 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อ Thermal efficiency ต่างกัน

เช่นเดียวกับการคำนวณผลกระทบจากเทคโนโลยี EPR โดยสมมติให้ Capacity factor ไม่มีผลต่อ Life time ของโรงไฟฟ้า ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้มีผลต่อขั้นตอน Construction และขั้นตอนส่วนหลังของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เมื่อระบบดำเนินการที่ Capacity factor สูงขึ้น หรือ Life time ของโรงไฟฟ้ายาวนานขึ้น ทำให้การปันส่วนปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน Construction ลดลง จากรูปที่2.16 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยเนื่องจากการก่อสร้างลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อ Capacity factor เพิ่มขึ้นในช่วงแคบๆ (86-87%) อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดของเทคโนโลยี และรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นชัดมากขึ้น เมื่อ Life time ของโรงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 40 ถึง 60 ปี ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน Construction และขั้นตอนส่วนหลังของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์มีค่าลดลง

ในส่วนของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ Diesel generator มีปริมาณไม่ถึง 1 % จากปริมาณทั้งหมด จึงละทิ้งจากการประเมินผลกระทบของงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.16 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อCapacity factor ต่างกัน



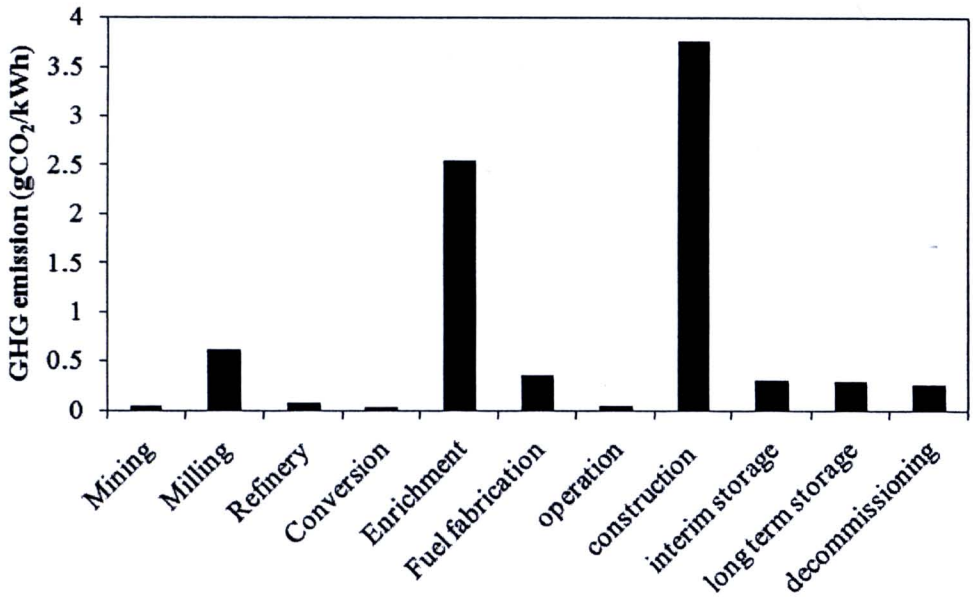
รูปที่ 2.17 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อ Life time ต่างกัน

2.4.3 **ผลการศึกษาความอ่อนไหวของตัวแปรภายใต้เทคโนโลยี** CANDU

2.4.3.1 **ผลการประเมินในกรณี** Base line

เนื่องจากเทคโนโลยี CANDU ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมจากธรรมชาติได้โดยตรงจึงไม่มีขั้นตอน Enrichment แต่มีกระบวนการผลิตน้ำมวลหนัก (D_2O) เพื่อใช้เป็นสารหล่อเย็น (Coolant) และสารกระตุ้น (Moderator) ผลการประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของกรณี Baseline ตามสภาวะ

ดังตารางที่ 3 มีค่าทั้งหมดประมาณ 8.27 gCO_2e/kWh ซึ่งแยกเป็นแต่ละขั้นตอนดังรูปที่ 2.18 จากรูปจะเห็นได้ว่าขั้นตอนที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดคือ ขั้นตอนการก่อสร้าง และขั้นตอนการผลิตน้ำมวลหนัก จักอธิบายต่อไป

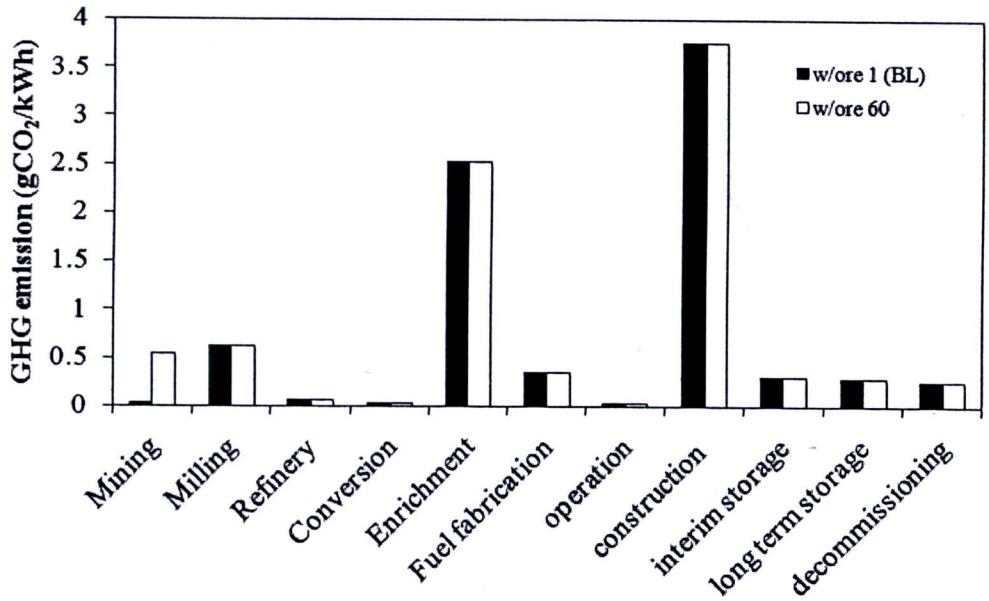


รูปที่ 2.18 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากกรณี Base line ที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี CANDU (ขั้นตอน Enrichment แทน ขั้นตอนการผลิตน้ำมวลหนัก)

2.4.3.2 **ผลการประเมินความอ่อนไหวของตัวแปรต่าง ๆ**

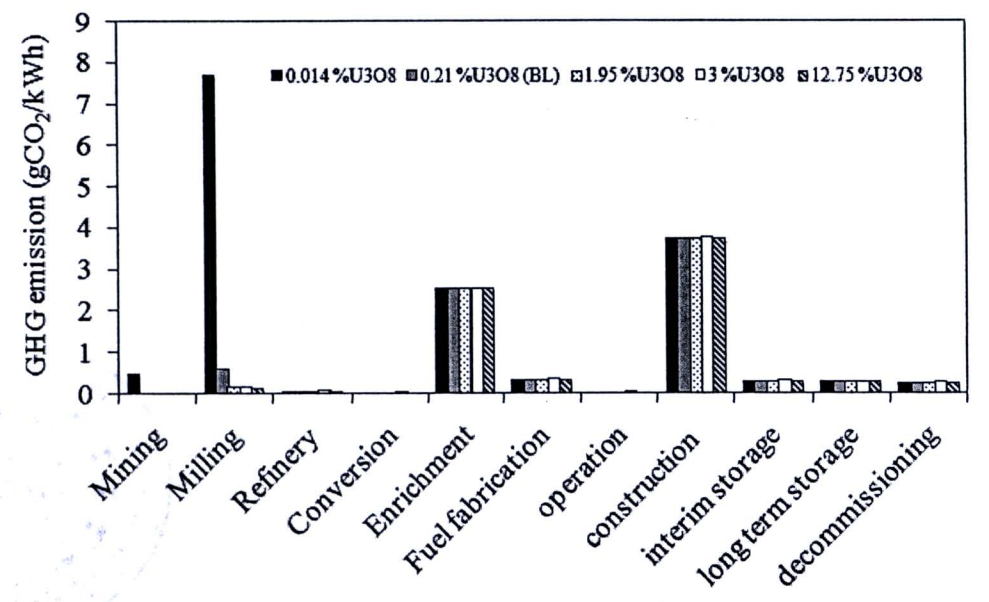
- ขั้นตอน Mining **และ** Milling

จากรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นว่า เมื่อสัดส่วนตัวแปร Waste to ore (W/O) เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 60 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน Mining เพิ่มขึ้นจาก 0.032 เป็น 0.544 gCO_2e/kWh และมีปริมาณก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยี EPR และ ABWR เนื่องมาจากเทคโนโลยี CANDU ไม่ต้องนำแร่ยูเรเนียมมาผ่านกระบวนการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม จึงใช้ปริมาณยูเรเนียมธรรมชาติลดลง และใช้พลังงานลดลง ตามลำดับ



รูปที่ 2.19 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี CANDU เมื่อ Waste to ore ratio ต่างกัน

ผลกระทบจาก Ore grade เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 0.014 เป็น 12.75% U_3O_8 ทำให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน Mining และ Milling ลดลงอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 2.20) โดยเฉพาะขั้นตอน Milling ปริมาณก๊าซเรือนกระจกสูงถึง 7.04 gCO_2e/kWh เมื่อความเข้มข้นของ U_3O_8 ต่ำที่สุด (0.014 %) และลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นของ U_3O_8 สูงที่สุด (12.75 % U_3O_8) เหลือเพียง 0.109 gCO_2e/kWh



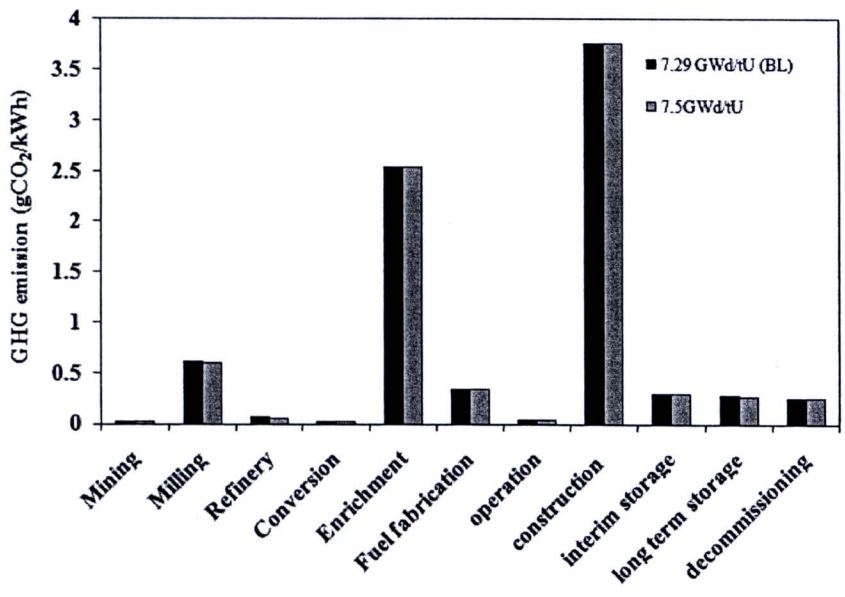
รูปที่ 2.20 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี CANDU เมื่อ Ore grade ต่างกัน

- **ขั้นตอน** Enrichment

ขั้นตอน Enrichment ในกรณีของเทคโนโลยี CANDU หมายถึง ขั้นตอนการผลิตน้ำมวลหนักหรือ D_2O โดยการ enriched deuterium น้ำธรรมดา (H_2O) ให้เป็น D_2O จากข้อมูลของเทคโนโลยี CANDU มีความต้องการปริมาณน้ำ D_2O เริ่มต้น 457 m^3 (Vuono และ Lee, 2009) และมีปริมาณลดลงทุกปีโดยเฉลี่ยปีละ 3,970 kg (Song, 1995) ทำให้ต้องใช้พลังงานในปริมาณมากเพื่อการผลิต จึงมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณสูงดังผลการประเมินข้างต้น

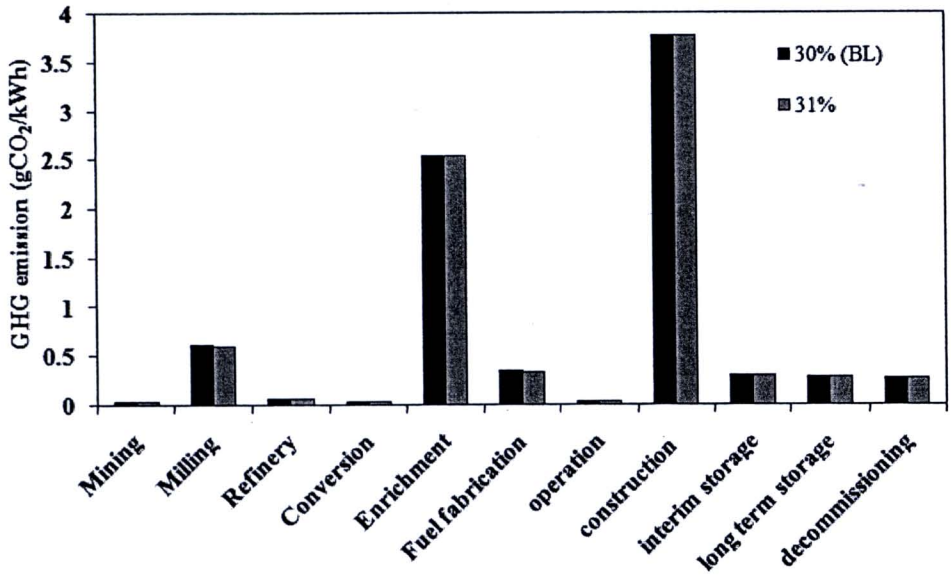
- **ขั้นตอน** Operation

ค่า Burn-up rate โดยทั่วไปของเทคโนโลยี CANDU อยู่ในช่วง 7.29 ถึง 7.5 GWd/tU ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเทคโนโลยี EPR และ ABWR จึงมีความต้องการเชื้อเพลิงยูเรเนียมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มากกว่า อยู่ในช่วง 1.85 $x10^{-8}$ tU / kWh (7.5 GWd/tU) ถึง 1.91 $x10^{-8}$ tU / kWh (7.29 GWd/tU) จากรูปที่ 2.21 พบว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกไม่มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเทคโนโลยี CANDU ต้องการปริมาณยูเรเนียมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้ามากกว่า แต่ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนส่วนหน้าของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์มีค่าน้อยกว่าเทคโนโลยี EPR และ ABWR เนื่องมาจากเทคโนโลยี CANDU สามารถใช้ยูเรเนียมธรรมชาติได้โดยตรง จึงไม่ต้องใช้ยูเรเนียมธรรมชาติในปริมาณมากเพื่อเสริมสมรรถนะยูเรเนียมดังเช่นเทคโนโลยีที่ใช้น้ำธรรมดาเป็นตัวหล่อเย็นและตัวกระตุ้น (EPR และ ABWR)



รูปที่ 2.21 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี CANDU เมื่อ Burn-up rate ต่างกัน

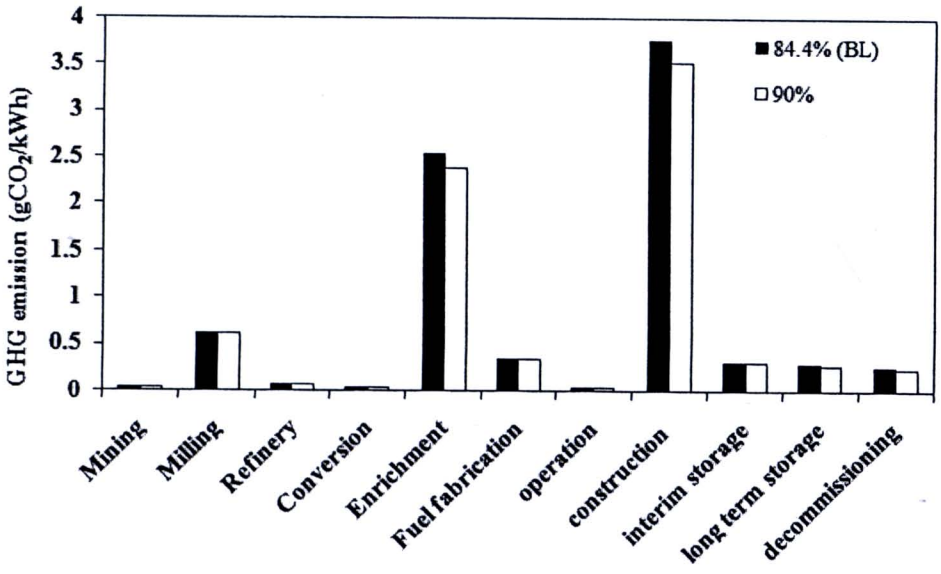
ในทำนองเดียวกันกับการเพิ่มค่า Thermal efficiency ในช่วง 30 ถึง 31% ปริมาณก๊าซเรือนกระจกไม่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเช่นกัน (รูปที่ 2.22) อาจเนื่องมาจากช่วงความแตกต่างทั้งค่า Burn-up rate และ ค่า Thermal efficiency มีความผันแปรในช่วงแคบ จึงไม่เห็นความแตกต่างปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างชัดเจน



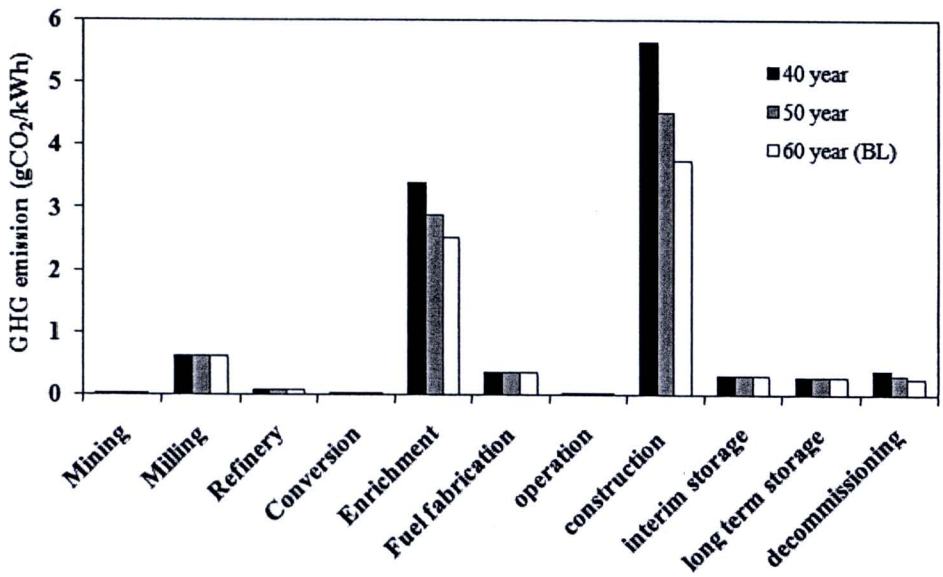
รูปที่ 2.22 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี CANDU เมื่อ Thermal efficiency ต่างกัน

ส่วนอิทธิพลของความผันแปรของค่า Capacity factor และ Life time ของโรงไฟฟ้า ให้ผลเช่นเดียวกับเทคโนโลยี EPR และ ABWR กล่าวคือ เมื่อระบบดำเนินการที่ Capacity factor สูงขึ้น หรือ Life time ของโรงไฟฟ้ายาวนานขึ้น ทำให้การปันส่วนปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน Construction ลดลง รวมถึงขั้นตอน Enrichment ในการผลิตน้ำ D_2O มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลง เช่นกัน (รูปที่ 2.23 และ 2.24)

ในส่วนของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ Diesel generator จากขั้นตอนการดำเนินการ (operation) มีปริมาณไม่ถึง 0.5 % จากปริมาณทั้งหมด จึงละทิ้งจากการประเมินผลกระทบของงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.23 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อ Capacity factor ต่างกัน



รูปที่ 2.24 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากเทคโนโลยี ABWR เมื่อ Life time ต่างกัน

2.4.4 **ขั้นการขนส่ง** (Transportation)

การประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการขนส่งวัตถุดิบ เช่น เชื้อเพลิงยูเรเนียม และวัสดุก่อสร้าง จากประเทศต่างๆ เข้าสู่ประเทศไทย พบว่ามีค่าน้อยมากน้อยกว่า 0.5% จากปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดตลอดทั้งวัฏจักร ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสมควรในการละทิ้งผลกระทบจากการขนส่ง นอกจากนี้ตำแหน่งที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทยยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน ณ เวลาที่ทำการวิจัย จึงไม่ได้มีผลต่อการประเมิน แต่ถ้าทราบที่ตั้งชัดเจนแล้วจึงนำมาพิจารณาร่วมด้วย อย่างไรก็ตาม คาดว่าการ

ปันส่วนปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งมีค่าเพียงเล็กน้อยจากปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้า

2.4.5 ขั้นตอนการก่อสร้าง (Construction)

จากการคำนวณพบว่าการก่อสร้างโรงไฟฟ้าจะใช้พลังงานในปริมาณมากประมาณ 2.45×10^8 kWh/plant และพลังงานความร้อน 9.98×10^6 GJ/plant ทำให้ระหว่างการก่อสร้างจึงมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมาก นอกจากนี้กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบการก่อสร้าง เช่น เหล็ก และซีเมนต์ ยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกทางหนึ่ง จากผลการประเมินข้างต้นแสดงให้เห็นว่าขั้นตอน Construction เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญต่อปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดตลอดทั้งวัฏจักรชีวิต แต่ผลกระทบจากการก่อสร้างนี้จะลดลงได้เมื่อโรงไฟฟ้าดำเนินการที่ Capacity factor สูง และ Life time ของโรงไฟฟ้ายาวนานขึ้นดังที่ได้กล่าวในหัวข้อข้างต้น

2.4.6 ขั้นตอนส่วนหลัง (Back-end)

ขั้นตอนส่วนหลังประกอบด้วยขั้นตอนการเก็บกากของเสียระยะสั้น (Interim storage) และการเก็บกากระยะยาว (Long term storage) รวมทั้งขั้นตอนการรื้อถอน (Decommissioning) ขั้นตอนเหล่านี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากต้องอาศัยพลังงานเป็นจำนวนมาก และปริมาณการการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนส่วนหลังของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของค่า Capacity factor และ Life time ของโรงไฟฟ้า

2.4.7 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือนกระจกตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตในแต่ละเทคโนโลยี

จากผลการประเมินปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของทั้งสามเทคโนโลยี จะได้ช่วงปริมาณก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุดถึงมากที่สุดของแต่ละขั้นตอนภายในวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ แสดงดังตารางที่ 2.4 เมื่อระบบดำเนินการที่สภาวะดีที่สุด จะเห็นว่า เทคโนโลยี EPR และ ABWR มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าเทคโนโลยี CANDU อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยี CANDU ดูเหมือนว่าจะมีความเสถียรเกี่ยวกับความอ่อนไหวของตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณก๊าซเรือนกระจกมากกว่าเทคโนโลยี EPR และ ABWR เช่น ตัวแปร W/O และ Ore grade เป็นต้น

เมื่อพิจารณาขั้นตอน Construction ของทั้งสามเทคโนโลยีจะเห็นว่า มีผลกระทบอย่างนัยสำคัญซึ่งมีปริมาณก๊าซเรือนกระจกสูงประมาณ 70% จากปริมาณทั้งหมด สำหรับเทคโนโลยี EPR และ ABWR หรือประมาณ 50% จากปริมาณทั้งหมด สำหรับเทคโนโลยี CANDU ในส่วนของตัวแปร Ore grade มีอิทธิพลโดยต่อเทคโนโลยี ABWR และ EPR เนื่องจาก มีผลต่อปริมาณแร่เพื่อนำมาสกัดและเสริมสมรรถนะ

ในขณะที่ Ore grade ไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อเทคโนโลยี CANDU เพราะเป็นเทคโนโลยีที่ไม่มีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม จึงไม่ได้รับผลกระทบมากนักเมื่อใช้ Ore grade ที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่ขั้นตอนการผลิตน้ำมวลหนัก (D_2O) เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อปริมาณก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยี CANDU ประมาณ 50% ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่รายงานผลปริมาณก๊าซเรือนกระจกโดยรวมของเทคโนโลยี ABWR เท่ากับ 6 gCO_2e/kWh (Done,1996) และเทคโนโลยี CANDU 3.2-15.41 gCO_2e/kWh (Andseta, 1998) ซึ่งอยู่ในช่วงผลการประเมิน

ตารางที่ 2.4 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของทั้งสามเทคโนโลยี

Stage	GHG emission (gCO_2e/kWh)		
	EPR	ABWR	CANDU
Mining	0.001-29.2	0.001-36.3	0.0005-8.16
Milling	0.083-10.6	0.141-13.2	0.112-7.69
Refinery	0.042-0.082	0.078-0.113	0.062-0.066
Conversion	0.021-0.041	0.036-0.051	0.028-0.030
Enrichment	0.031-2.95	0.049-3.31	2.38*-3.40*
Fuel fabrication	0.016-0.022	0.031-0.038	0.326-0.347
Operation	0.011-0.012	0.031-0.031	0.034-0.037
construction	2.09-3.39	2.57-3.10	3.52-5.64
interim storage	0.026-0.037	0.051-0.063	0.287-0.305
long term storage	0.062-0.072	0.090-0.097	0.266-0.283
decommissioning	0.106-0.172	0.138-0.21	0.245-0.392
transportation	0.010-0.016	0.008-0.012	0.034-0.039
Total	**2.50-46.6**	**3.22-57.4**	**7.30-26.4**
Literature		6[a]	3.2-15.41[b]

* Deuterium production

แหล่งที่มา: (a) Done (1996) and (b) Andseta (1998)

2.4.8 เปรียบเทียบแหล่งกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่างๆ

จากผลการประเมินปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ อยู่ในช่วง 2.50 ถึง 57.4 gCO_2e/kWh ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการใช้เชื้อเพลิงจากซากสิ่งมีชีวิต (ตารางที่ 2.5) นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่งผลกระทบใกล้เคียงกับการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ และจากชีวมวล แต่ปริมาณ

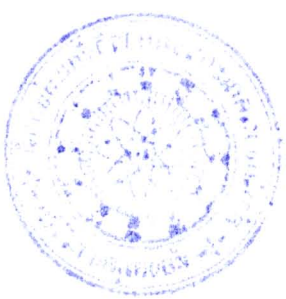
ก๊าซเรือนกระจกโดยเฉลี่ยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ยังคงสูงกว่าการใช้พลังงานลมและน้ำ อย่างไรก็ดี ถ้าตลอดทั้งวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้พลังงานไฟฟ้าถ่านหิน ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยออกมาในแต่ละเทคโนโลยีนิวเคลียร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 2.6 พบว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกค่าสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 175.17 และ 144.62 gCO_2e/kWh (เทคโนโลยี ABWR และ EPR) และ 30.76 gCO_2e/kWh (เทคโนโลยี CANDU)

ตารางที่ 2.5 ช่วงปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากโรงไฟฟ้าชนิดต่างๆ

Type of power plant	GHG emission (gCO_2e/kWh)	References
Nuclear power	2.50 – 57.4	This work
Coal fired	975	Hondo (2005)
Oil fired	742	Hondo (2005)
Gas fired	608	Hondo (2005)
Hydro power and wind turbine	15-25	Lenzen (2008)
Solar photovoltaic	53-90	Hondo (2005) and Lenzen (2008)
biomass	14-41	Pehnt (2006) and Ramjeawon (2008)

ตารางที่ 2.6 ช่วงปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากจากเทคโนโลยีนิวเคลียร์ต่างๆ เมื่อใช้ถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้า

Technology	GHG emission (gCO_2e/kWh)
EPR	3.00-144.82
ABWR	3.78 -175.41
CANDU	8.37- 30.62

2.5 สรุปผลการวิจัย

จากผลการประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์พบว่า มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงอื่นๆ ช่วงปริมาณก๊าซเรือนกระจกค่อนข้างมีความผันแปรอย่างมีนัยสำคัญระหว่างปริมาณต่ำสุดและสูงสุด เบื้องต้นอาจเป็นเพราะความต้องการวัตถุดิบที่แตกต่างกัน วิธีเสริมสมรรถนะยูเรเนียม และลักษณะเฉพาะของเทคโนโลยี เมื่อระบบดำเนินการที่สภาวะดีที่สุด มีเกรดแร่สูงสุดและวิธีเสริมสมรรถนะที่เหมาะสม ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจะอยู่ในระดับต่ำประมาณ 2.50 gCO_2e/kWh ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบดำเนินการที่สภาวะที่มีการใช้เกรดแร่ต่ำๆ และวิธีเสริมสมรรถนะที่ล้าสมัยใช้พลังงานสูง จะปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมากถึง 57.37 gCO_2e/kWh จากการคำนวณโดยใช้สมมติฐานที่ตั้งไว้ แสดงให้เห็นว่า เทคโนโลยี EPR และ ABWR มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าเทคโนโลยี CANDU ในทางกลับกัน ถ้าระบบการเตรียมและผลิตแท่งเชื้อเพลิงไม่เหมาะสม เทคโนโลยี CANDU จะปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่า ดังนั้นในการออกแบบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ควรพิจารณาในหลายปัจจัย เช่น แหล่งแร่ยูเรเนียม เทคโนโลยีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม และเกรดแร่ยูเรเนียม เป็นต้น ถึงแม้ว่าประเทศไทยยังไม่ระบุสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่แน่นอน การวิเคราะห์และประเมินความอ่อนไหวของตัวแปรในเรื่องของการขนส่งพบว่ามีปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพียงเล็กน้อยจากปริมาณการปลดปล่อยตลอดทั้งวัฏจักรจึงละทิ้งไป และถ้าการประเมินผลกระทบในครั้งนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากถ่านหิน จะทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มมากขึ้นถึง 175 gCO_2e/kWh