

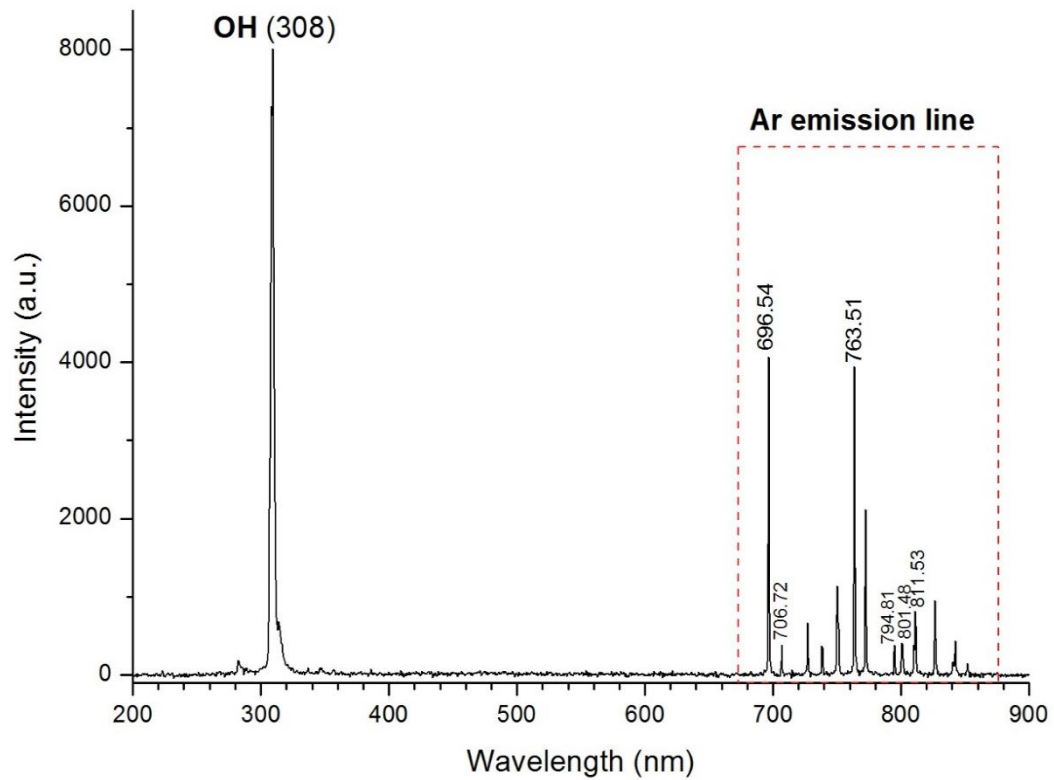
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

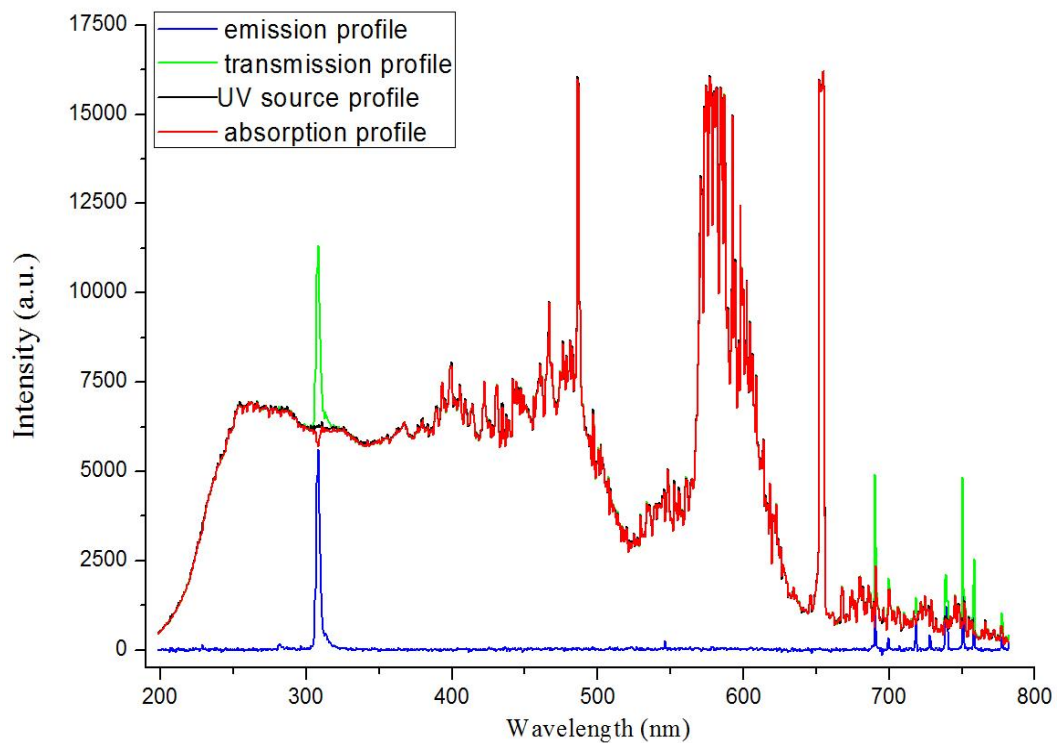
#### 4.1 ความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลและไนตริกออกไซด์ในพลาสมาจากหัวเมดิพลาสมา

เมื่อทำการผลิตพลาสมาขึ้นความดันบรรยากาศด้วยหัวเมดิพลาสมา มีก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซทำงาน โดยหัวเมดิพลาสมาอยู่สูงจากพื้นผิวกระจกสไลด์ 1.0 mm จากการวัดสเปกตรัมแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมาพบว่า พลาสมาประกอบด้วยอนุมูลไฮดรอกซิล OH และกลุ่มของอะตอมอาร์กอน ไม่มีกลุ่มอะตอมหรือโมเลกุลที่มีไนโตรเจน ออกซิเจนและอนุมูลไนตริกออกไซด์เกิดขึ้นในพลาสมาที่ผลิตด้วยหัวเมดิพลาสมาและผลิตพลาสมาด้วยเงื่อนไขที่กล่าวมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สอดคล้องกับกลไกในการทำให้เกิด NO ที่เกิดจากการชนกันระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลของไนโตรเจนและอะตอมหรือโมเลกุลออกซิเจน และการชนกันระหว่าง  $\text{NO}_2$  ที่เกิดการปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนและออกซิเจน กับอะตอมออกซิเจนที่อยู่ในสถานะกึ่งเสถียร นอกจากนี้การที่ความเข้มแสงของ OH มากกว่าค่าความเข้มแสงของกลุ่มอะตอมอาร์กอนและการที่ไม่มีกลุ่ม  $\text{N}_2$  second positive system ทำให้ทราบว่าพลาสมาที่ผลิตจากหัวเมดิพลาสมามีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานกับผิวหนังมนุษย์หรือการใช้งานในทางชีวการแพทย์

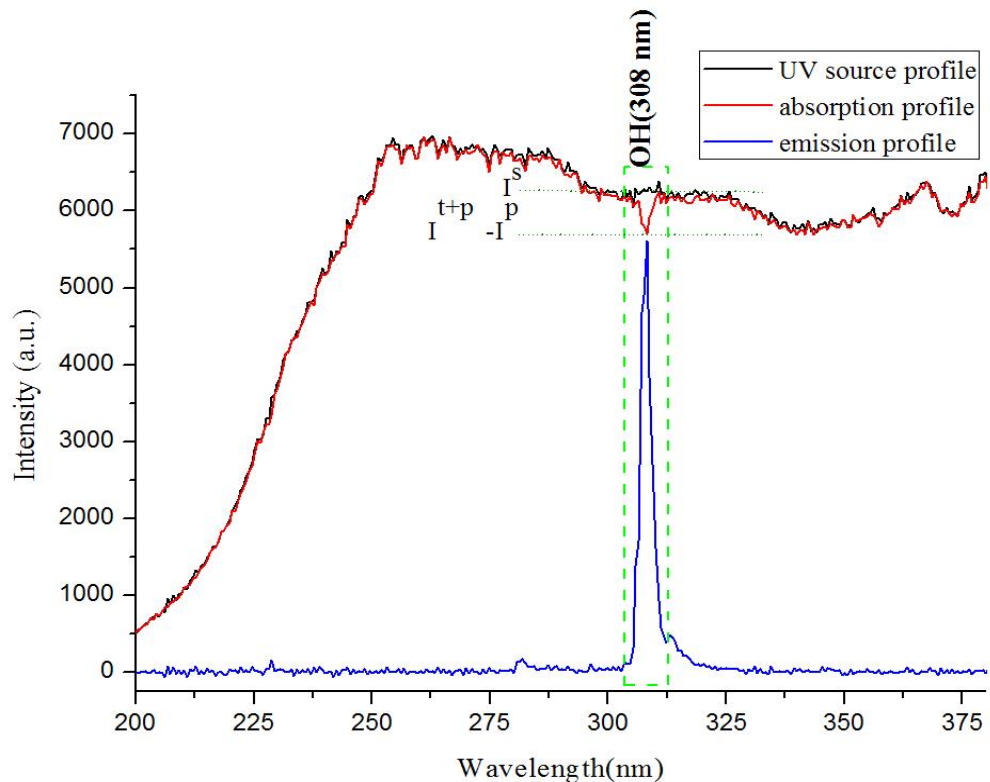
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved



รูปที่ 4.1 โพรไฟล์การเปล่งแสงของพลาสมาเย็นความดันบรรยากาศที่ผลิตด้วยหัวเมดิพลาสมา



รูปที่ 4.2 แสดงโปรไฟล์การดูดกลืนแสงยูวีของอนุภาคไฮโดรเจล



รูปที่ 4.3 แสดงภาพขยายโปรไฟล์การดูดกลืนแสงยูวีของอนุมูลไฮดรอกซิล

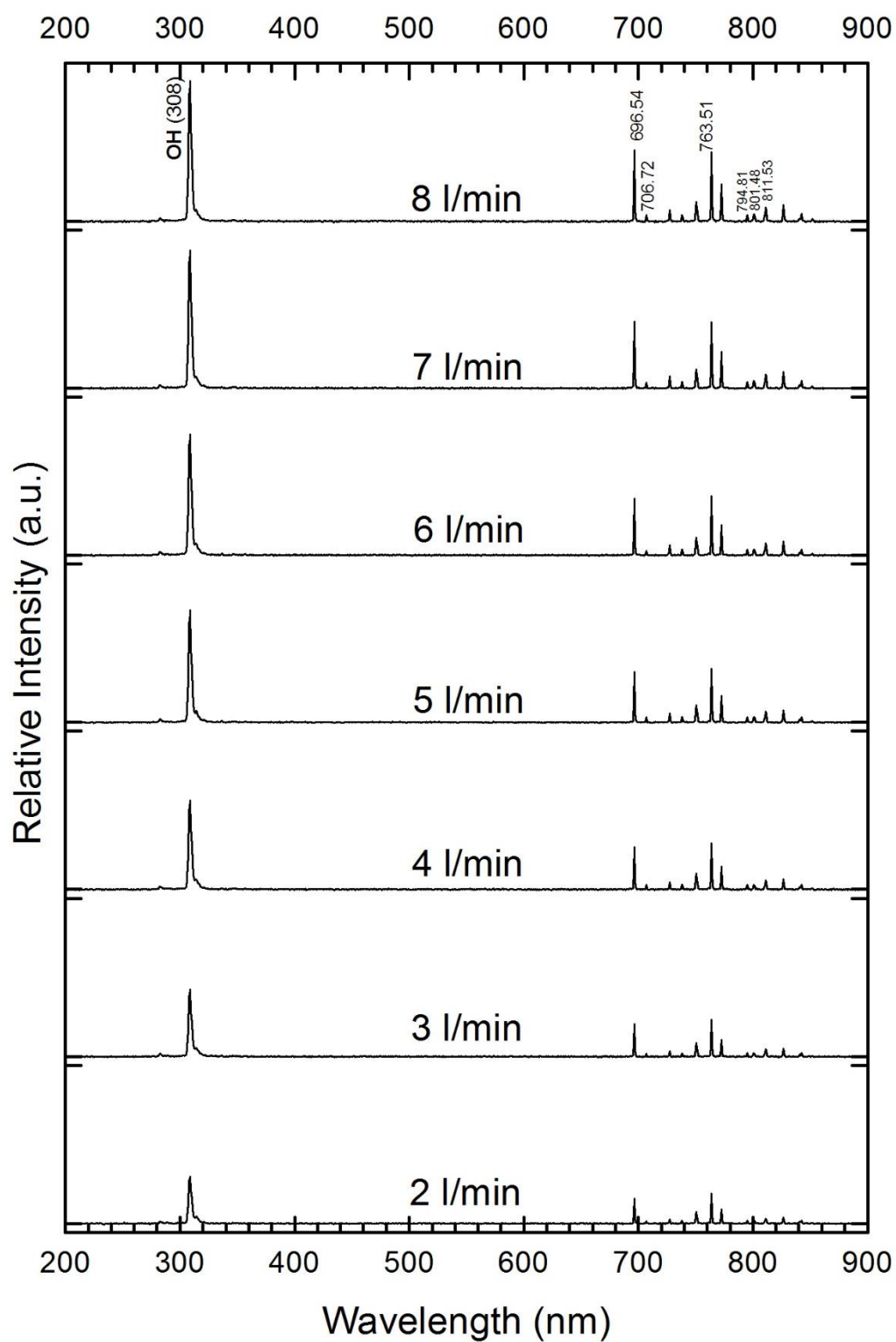
ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดง แสงยูวีจากหลอดควเทอร์มที่ความยาวคลื่น 308.0 nm มีความเข้ม  $I^s$  ถูกดูดกลืนด้วยอนุมูลไฮดรอกซิลขณะที่เคลื่อนที่ผ่านพลาสมาเป็นระยะทาง  $l$  และความเข้มแสงลดลงจนมีความเข้มที่เหลือเป็น  $I^{t+p} - I^p$  ซึ่งจากโปรไฟล์การดูดกลืนแสงยูวีของอนุมูลไฮดรอกซิลนี้สามารถประมาณความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่อยู่ในสถานะพื้นได้โดยใช้กฎการดูดกลืนของเบียร์-แลมเบิร์ตและในการทดลองทั้งหมดตลอดงานวิจัยครั้งนี้ทำภายใต้ความคลาดเคลื่อน 5 %

เมื่อทำการวัดความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลบนผิวกระจกสไลด์ จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวกระจกสไลด์ตรงตำแหน่ง  $r = 0.0$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อัตราไหลก๊าซเท่ากับ 8.0 l/min โดยมีค่าประมาณ  $1.68 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลจากสเปกโทรสโคปีแบบเปล่งแสง OES ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 โดยจากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเมื่ออัตราไหลของก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 308 nm ซึ่งเปล่งออกมาจากโมเลกุลไฮดรอกซิลจะมีค่าเพิ่มขึ้นและจากรูปที่ 4.5 จะเห็นความเข้มแสงของอนุมูลไฮดรอกซิลแปรผันโดยตรงกับความเข้มแสงของอะตอมอาร์กอนในสถานะกึ่งเสถียร (Ar metastable;  $\text{Ar}^m$ ) ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลนั้นเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของอาร์กอนสถานะกึ่งเสถียร สอดคล้องกับกลไกการเกิด OH ในพลาสมาเย็นความดันบรรยากาศซึ่งโดยหลักแล้วเกิดจากการชนกันระหว่างไอออน้ำ

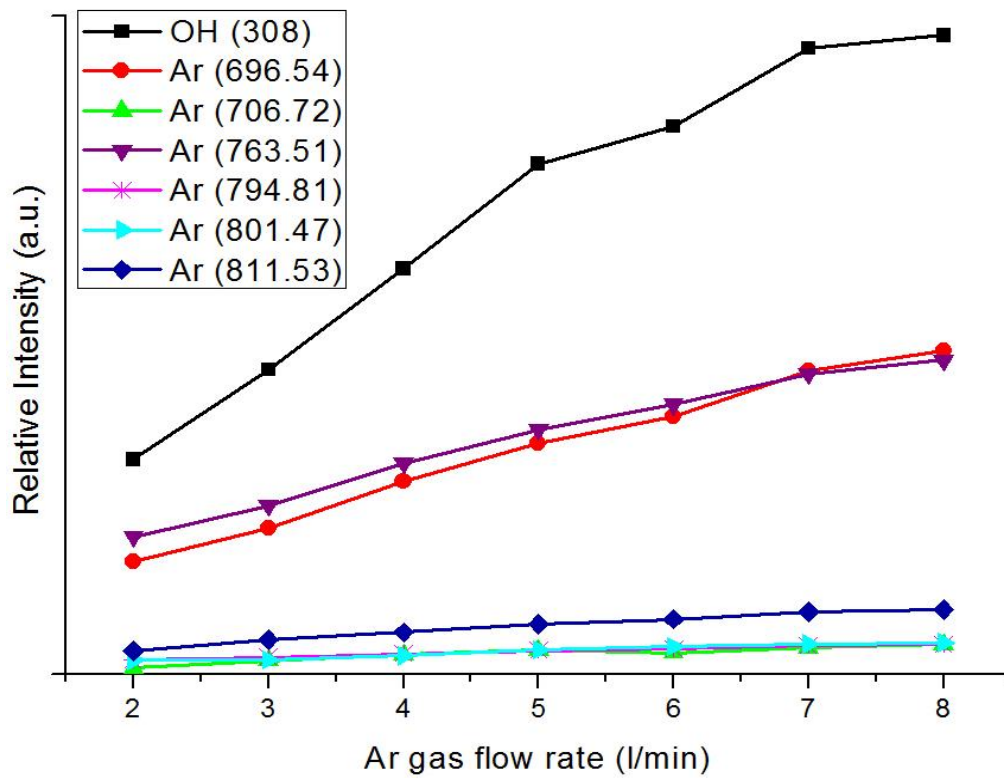
ในอากาศและอะตอมอาร์กอนในสถานะกึ่งเสถียร จึงสามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการของก๊าซอาร์กอน 8 l/min ทำให้หัวเมดิพลาสมาสามารถผลิตอะตอมอาร์กอนในสถานะกึ่งเสถียรได้มากที่สุดซึ่งจะส่งผลต่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลมากที่สุดในช่วงการไหลของอาร์กอน 2.0 ถึง 8.0 l/min โดยมีเงื่อนไขการผลิตคือ หัวเมดิพลาสมาอยู่ห่างจากกระจกสไลด์ 1.0 mm โดยกระจกสไลด์นี้วางอยู่บนแผ่นกราวด์ และการผลิตพลาสมาใช้พลังงานระดับ level = 5 และความถี่  $f = 50$  Hz ที่กำหนดไว้บนจอแสดงผลของเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงของระบบ Hybrid Jet-Floating electrode plasma



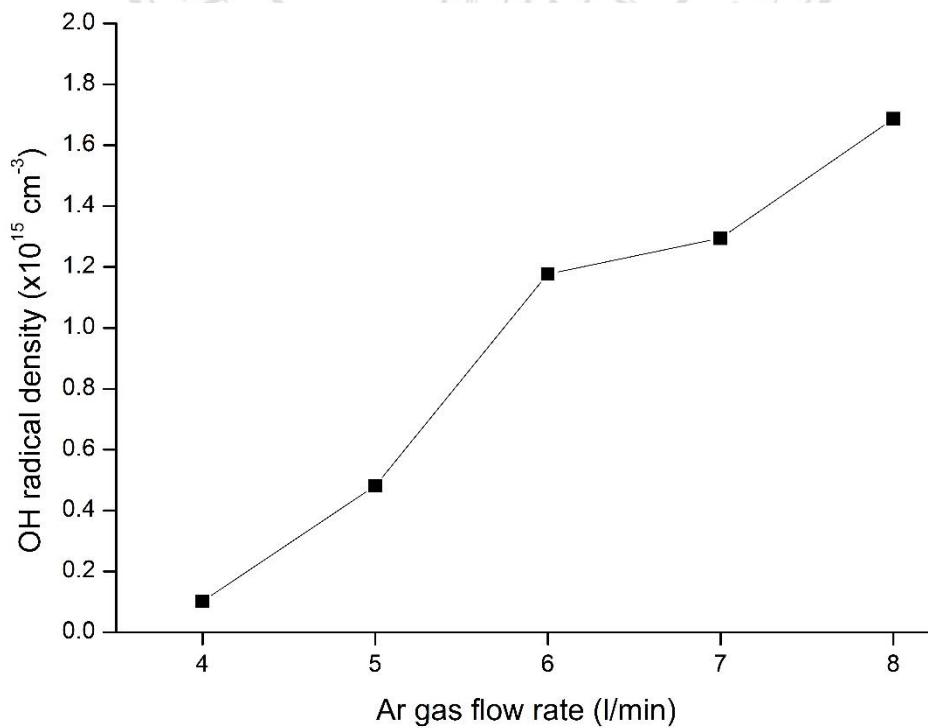
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved



รูปที่ 4.4 ความเข้มแสงสัมพัทธ์ของอนุภาคไฮดรอกซิลและอะตอมอาร์กอนกึ่งเสถียรที่เปล่งออกมาจากพลาสมาเย็นที่ผลิตจากหัวเมดิพลาสมาในช่วงอัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 2.0 l/min ถึง 8.0 l/min

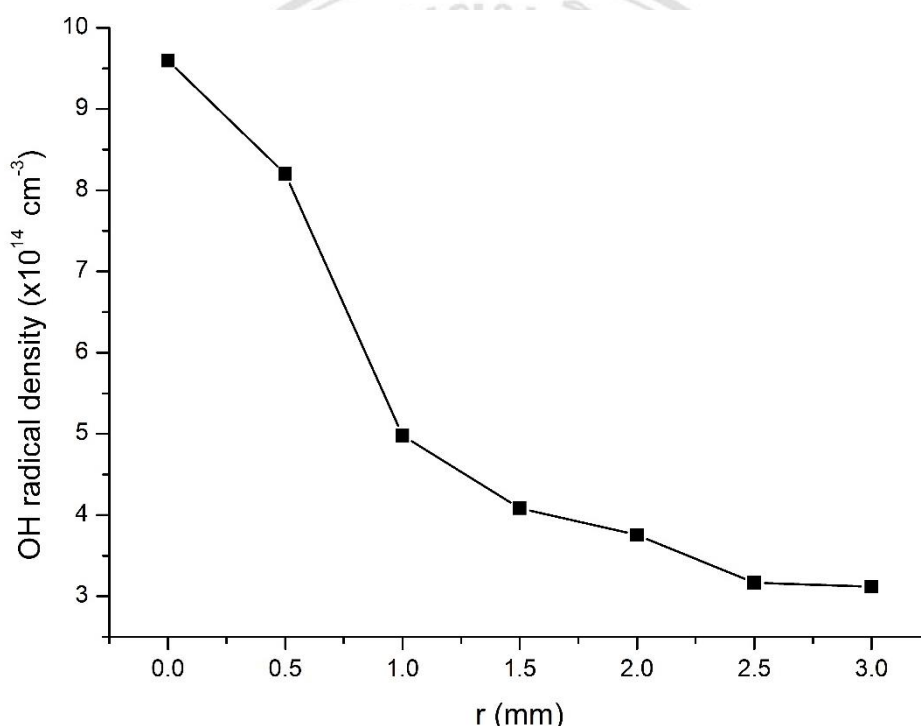


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความเข้มแสงของอนุมูลไฮดรอกซิลและอาร์กอนกึ่งเสถียรเทียบกับอัตราไหลของก๊าซอาร์กอนตั้งแต่ 2.0 l/min ถึง 8.0 l/min



รูปที่ 4.6 แสดงความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลบนผิวกระจกที่อัตราไหลของก๊าซอาร์กอนในช่วง 4.0 l/min ถึง 8.0 l/min

สำหรับรูปแบบการกระจายตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวกระจกสไลด์นั้น สามารถทราบได้โดยการวัดความหนาแน่นของอนุมูลที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆ และใช้ micro stage XY table ในการปรับตำแหน่ง พบว่าอนุมูลไฮดรอกซิลมีความหนาแน่นมากที่สุดตรงตำแหน่งจุดศูนย์ ( $r = 0.0$ ) และลดลงตามแนวรัศมี โดยค่าความหนาแน่นของ OH มีค่ามากที่สุดเท่ากับ  $9.50 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  ทั้งนี้เนื่องจากพลาสมาที่ตำแหน่ง  $r = 0.0$  นั้นเป็นผลรวมของเจ็ทพลาสมาและพลาสมาแบบ floating ที่เกิดจากการดิสชาร์จโดยใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดศักย์สูงและแผ่นกราวด์ที่อยู่ใต้แผ่นกระจกสไลด์



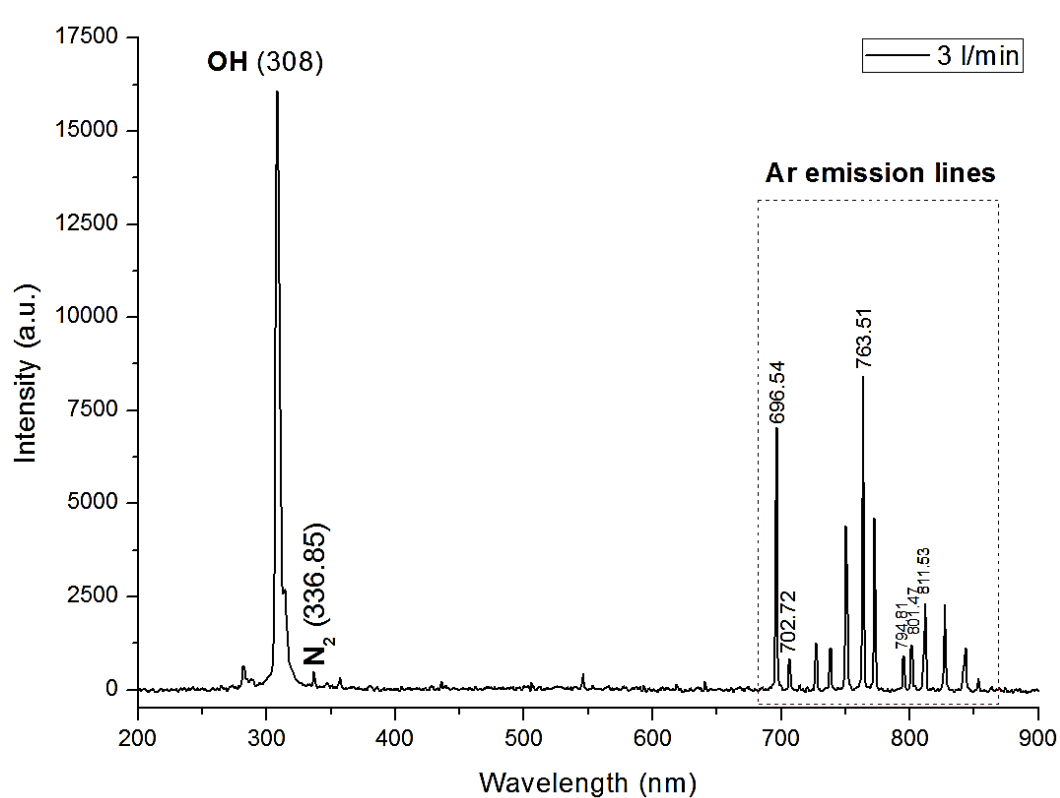
รูปที่ 4.7 แสดงความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งต่างๆ บนผิวกระจกที่ถูกประยุกต์ด้วยพลาสมาเย็นของหัวเมดิพลาสมาโดยใช้ก๊าซที่มีอัตราไหล 8.0 l/min

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะสังเกตได้ว่าที่เงื่อนไขการผลิตพลาสมาเดียวกัน อัตราไหลก๊าซอาร์กอน 8 l/min เหมือนกัน ความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่วัดที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของหัวเมดิพลาสมา ( $r = 0.0$ ) มีค่าที่แตกต่างกัน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการที่ทั้ง 2 การทดลองได้กระทำในช่วงเวลาที่ต่างกัน ทำให้มีไอน้ำในอากาศมีจำนวนมากขึ้นน้อยต่างกันไป กล่าวคือ ผลการทดลองในรูปที่ 4.6 ทำการทดลองในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 65.0 % ในขณะที่ผลการทดลองในรูปที่ 4.7 ทำการทดลองในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 59.0 % ซึ่งปริมาณไอน้ำในอากาศมีผลโดยตรงกับจำนวนอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้น นอกเหนือจากนี้ยังมีผลของเวลาในการเก็บรวบรวมแสงของ

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (integration time) มาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งผลของ integration time จะแสดงให้เห็นในผลการทดลองตอนต่อไป โดยผลการทดลองในรูปที่ 4.6 ในการเก็บข้อมูลใช้เวลา integration time เท่ากับ 600 ms ในขณะที่ผลการทดลองในรูปที่ 4.7 ใช้ integration time เท่ากับ 500 ms ทั้งนี้มีเงื่อนไขหลายอย่างที่ไม่สามารถกำหนดให้เก็บข้อมูลโดยใช้ integration time เดียวกันได้ ทำให้ค่า integration time ที่เหมาะสมของแต่ละการทดลองแตกต่างกันไป เช่น ความเข้มแสงของหลอดคิวเทอริยมที่บางครั้งมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เมื่อรวมกับแสงจากพลาสมาซึ่งก็มีค่าเปลี่ยนแปลงได้แล้ว จึงต้องมีการกำหนด integration time ให้สามารถเห็นการดูดกลืนยูวีของอนุภาคได้ ในขณะที่เดียวกันก็ต้องจำกัดไม่ให้สัญญาณแสงนี้มีค่าเกินกว่าค่าความเข้มแสงอิมพัลส์ของสเปกโตรมิเตอร์ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้

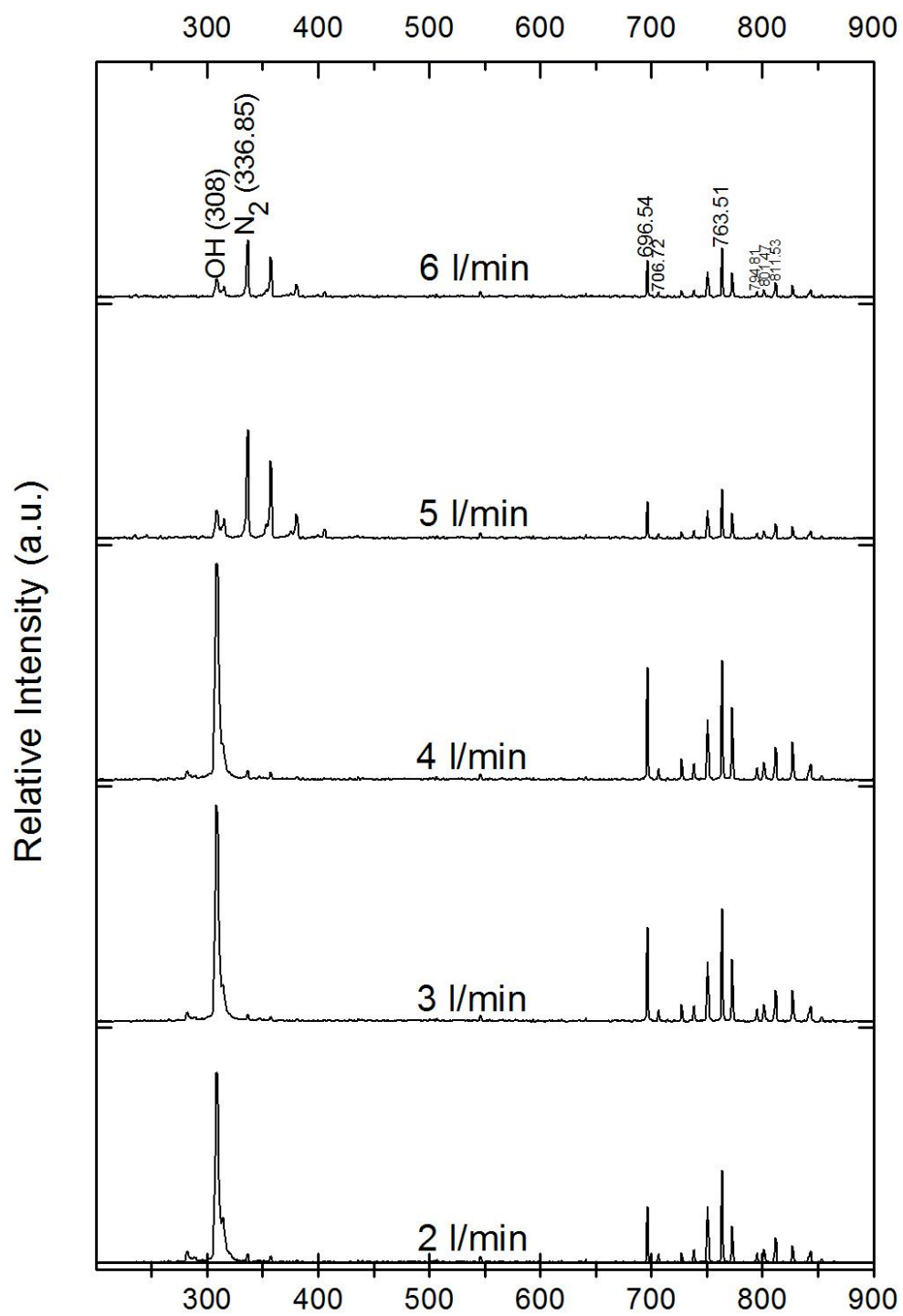
#### **4.2 ความหนาแน่นของอนุภาคไฮดรอกซิลและไนตริกออกไซด์ในพลาสมาจากการดิสชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge)**

ในการวัดความหนาแน่นของอนุภาคไฮดรอกซิลและอนุภาคนไนตริกออกไซด์ในพลาสมาจากการดิสชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge) จากการพิจารณาโปรไฟล์การเปล่งแสง (emission profile) ของพลาสมาพบว่าในพลาสมาความดันบรรยากาศนี้ประกอบด้วยอนุภาคไฮดรอกซิล กลุ่มของอาร์กอนและกลุ่มของ  $N_2$  second positive system ( $N_2$  SPS) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และจากรูปที่ 4.9 ที่แสดงโปรไฟล์การเปล่งแสงของพลาสมาที่อัตราไหลก๊าซอาร์กอนตั้งแต่ 2.0 ถึง 6.0 l/min พบว่าความเข้มแสงจากอนุภาคไฮดรอกซิลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราไหลเพิ่มจาก 2.0 l/min เป็น 3.0 l/min และมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราไหลของอาร์กอนเป็น 4.0 l/min และลดลงเมื่ออัตราไหลเป็น 5.0 l/min และ 6.0 l/min ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นและลดลงของความเข้มแสงของกลุ่มอะตอมอาร์กอนกึ่งเสถียร ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 หรือกล่าวได้ว่า การเกิดอนุภาคไฮดรอกซิลแปรผันโดยตรงกับการเกิดของอาร์กอนกึ่งเสถียร ในขณะที่เดียวกันที่อัตราไหล 5.0 l/min กลับมีการเกิดกลุ่มของ  $N_2$  SPS มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามด้วยเงื่อนไขการผลิตพลาสมาของการทดลองนี้ยังไม่สามารถทำให้เกิดอนุภาคนไนตริกออกไซด์ได้

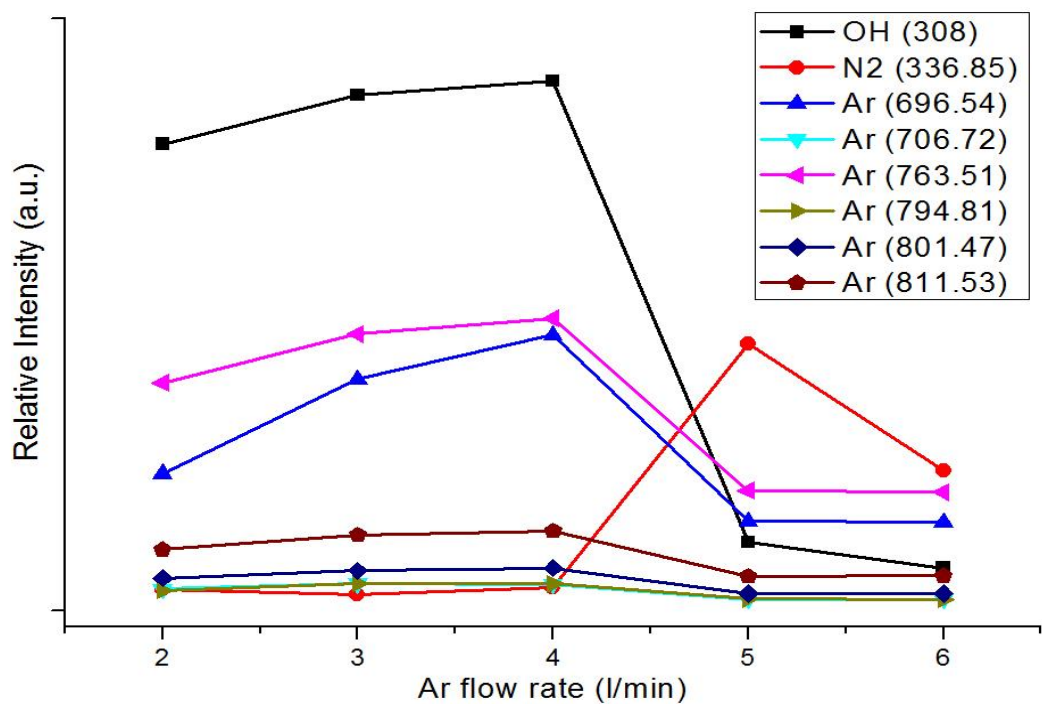


รูปที่ 4.8 โพรไฟล์การเปล่งแสงของพลาสมาความดันบรรยากาศจากการดิสชาร์จข้ามฉนวน

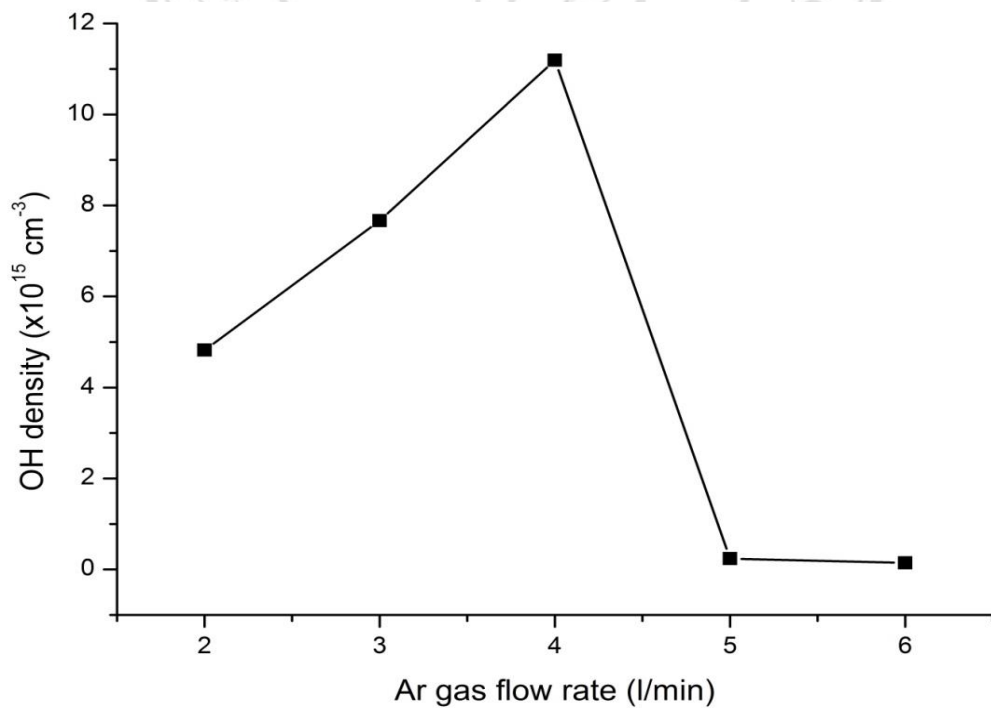
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved



รูปที่ 4.9 โปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงของพลาสมาจากการดิสชาร์จข้ามฉนวนที่อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 2.0 l/min ถึง 6.0 l/min

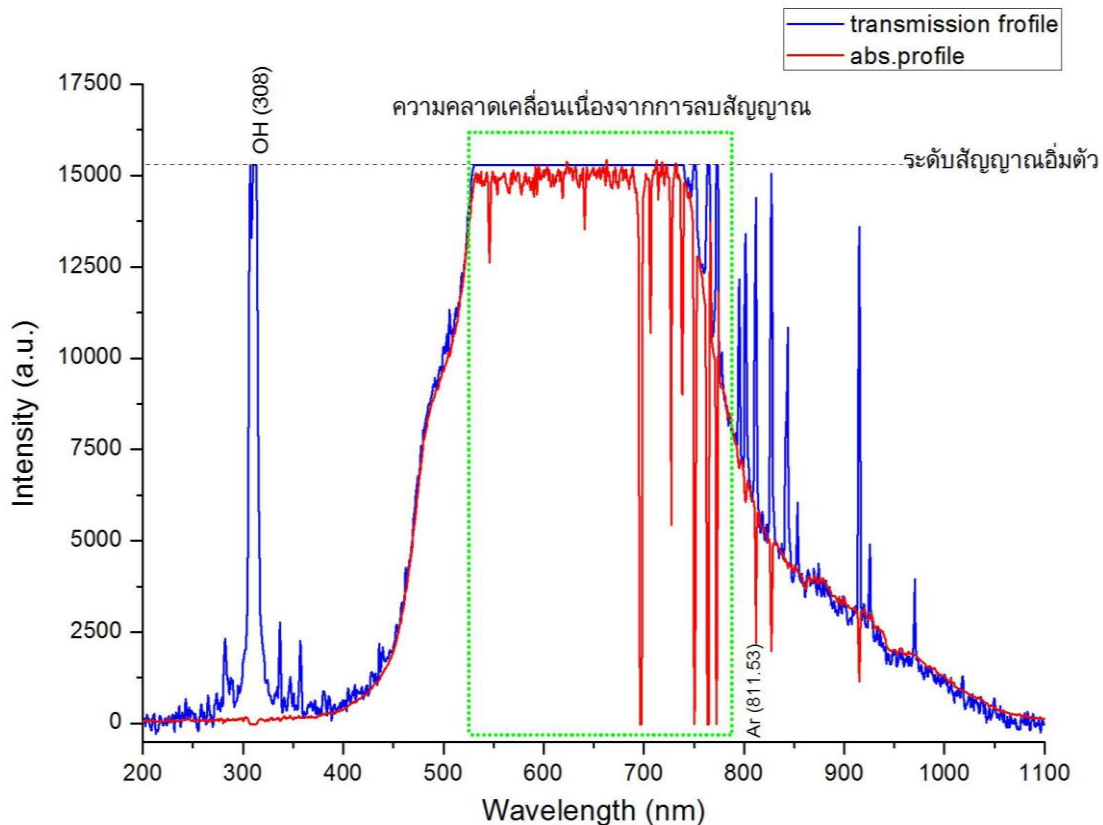


รูปที่ 4.10 ความเข้มแสงสัมพัทธ์ของอนุมูลไฮดรอกซิลและอะตอมอาร์กอนกึ่งเสถียรที่เปล่งออกมาจากพลาสมาเย็น DBD ในช่วงอัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 2.0 l/min ถึง 6.0 l/min



รูปที่ 4.11 ความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลในพลาสมาจากการดิสชาร์จข้ามฉนวน

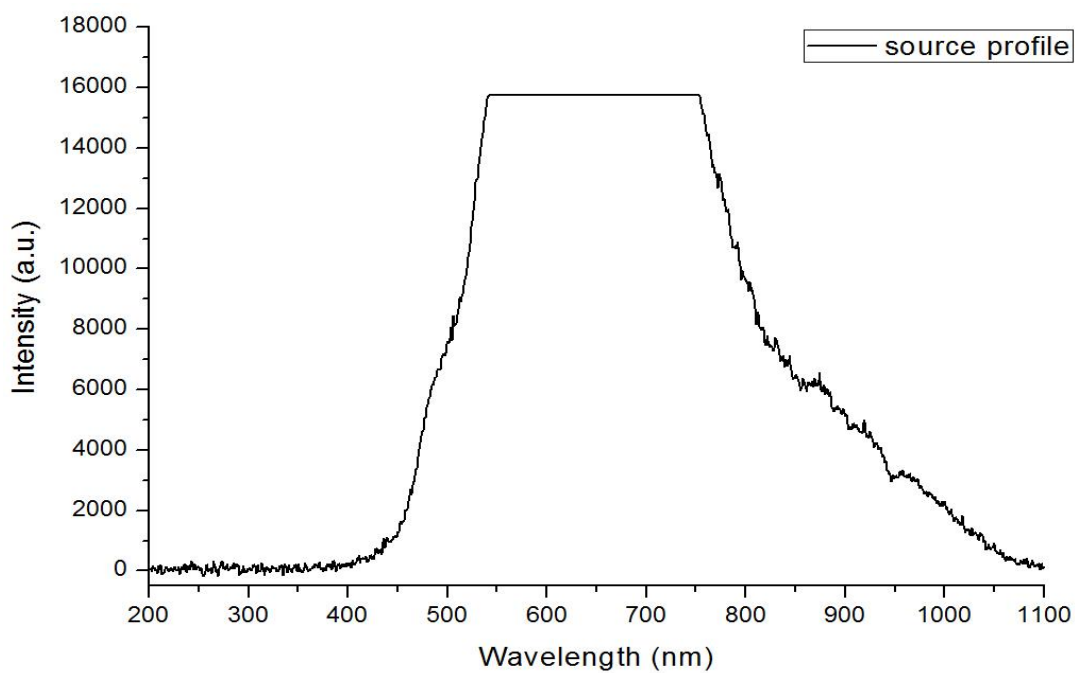
เมื่อทำการวัดความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่อัตราไหลของก๊าซอาร์กอนค่าต่างๆ โดยใช้ integration time 500 ms พบว่า ความหนาแน่นของอนุมูลนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราไหลเพิ่มขึ้นจาก 2.0 l/min ไป 4.0 l/min และมีค่าสูงสุดประมาณ  $1.10 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ที่อัตราไหล 4.0 l/min จากนั้นมีค่าลดลงเมื่ออัตราไหลเป็น 5.0 l/min และ 6.0 l/min ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก OES และยังสอดคล้องกับผลของการวัดความหนาแน่นของอาร์กอนกึ่งเสถียรโดยสเปกโทรสโคปีแบบดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 811.53 nm



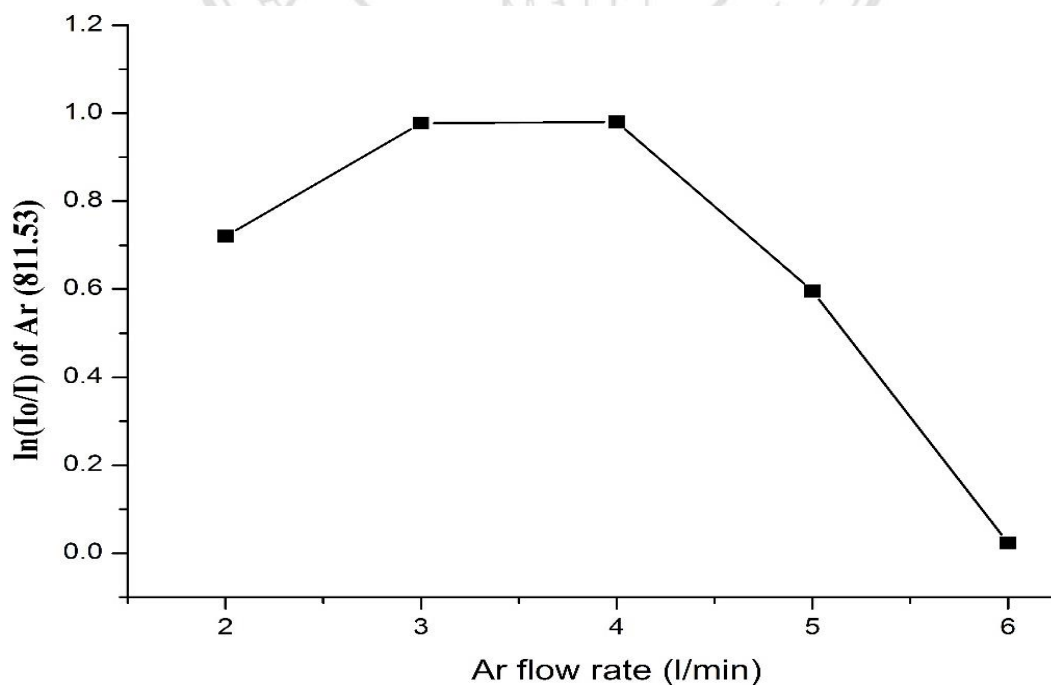
รูปที่ 4.12 โปรไฟล์การดูดกลืนแสงของอะตอมอาร์กอนกึ่งเสถียรที่ความยาวคลื่น 811.53 nm

ภาพที่ 4.12 แสดงโปรไฟล์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 811.53 nm ของอะตอมอาร์กอนสถานะกึ่งเสถียร  $^3P_2$  และโปรไฟล์แสงจากหลอดฮาโลเจนซึ่งใช้เป็นแสงสำหรับสเปกโทรสโคปีแบบดูดกลืนแสง ซึ่งในกราฟจะเห็นว่า มีแสงบางช่วงความยาวคลื่นมีค่าความเข้มเกินขีดจำกัดของค่าความเข้มแสงอ้อมตัวที่สเปกโตรมิเตอร์รับได้ ทำให้ข้อมูลในช่วงนี้ไม่อาจนำไปใช้ในการวิเคราะห์ใดๆ ได้ การที่เกิดเหตุการณ์แบบนี้เนื่องมาจากการใช้ integration time ในการทดลองให้มีค่ามาก เพื่อจะได้เห็นการดูดกลืนแสงของอะตอมอาร์กอนในสถานะกึ่งเสถียรได้ เนื่องจากหากดูจากผล OES จะเห็นว่า มีโอกาสที่อาร์กอนกึ่งเสถียรจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานโดยให้หรือรับแสงที่ความยาวคลื่น 811.53 nm เกิดขึ้นได้น้อย และเนื่องจากสเปกตรัมของหลอดฮาโลเจนที่ความยาว 811.53 nm มีความ

เข้มแสงต่ำ ซึ่งในการทดลองอื่นอาจใช้การดูคลื่นแสงของอาร์กอนถึงเสถียรที่ความยาวอื่นๆที่สะดวกกว่านี้

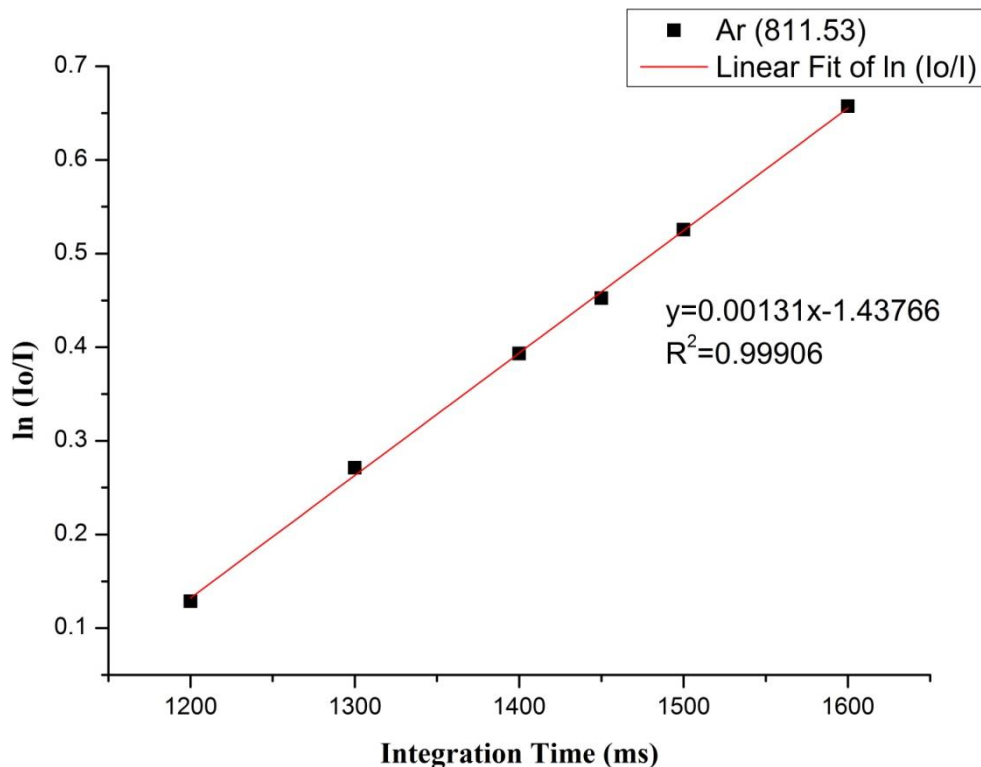


รูปที่ 4.13 แสดงโปรไฟล์ของแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.14 การดูคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 811.53 nm ของอะตอมอาร์กอนถึงเสถียรในพลาสมาจากการดิสชาร์จข้ามฉนวนในช่วงการไหลก๊าซอาร์กอนในช่วง 2.0 l/min ถึง 6.0 l/min

จากรูปที่ 4.14 เนื่องจากการหาข้อมูลไม่พบข้อมูล absorption cross section สำหรับการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 811.53 nm ของอะตอมอาร์กอนในสถานะกึ่งเสถียร เพื่อเปลี่ยนสถานะ  $1s_5 \rightarrow 2p_9$  จึงได้แสดงผลเป็นลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm;  $\ln$ ) ของอัตราส่วนของความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 811.53 nm ก่อน ( $I_0$ ) และหลัง  $I$  ถูกดูดกลืนด้วยอะตอมอาร์กอนกึ่งเสถียร ซึ่งจะเห็นว่าการดูดกลืนแสงของอาร์กอนกึ่งเสถียรนี้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราไหลของอาร์กอนเพิ่มขึ้นจาก 2.0 l/min ไปเป็น 4.0 l/min และลดลงเมื่ออัตราไหลเป็น 5.0 l/min และ 6.0 l/min



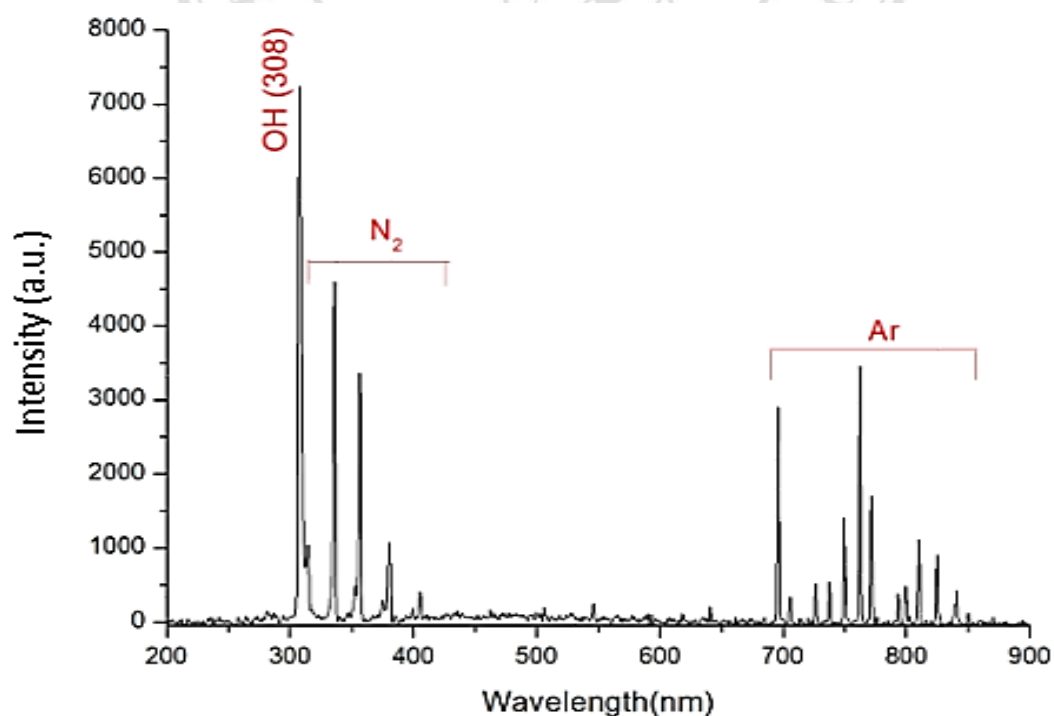
รูปที่ 4.15 ค่าการดูดกลืนแสงกึ่งเสถียรที่ความยาวคลื่น 811.53 nm ของอะตอมอาร์กอนเมื่อเก็บค่าข้อมูลความเข้มแสงด้วยสเปกโตรมิเตอร์โดยใช้ integration time ต่างกัน

ในการทดลองหาผลของการใช้ integration time ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของอนุภาควัดได้พบว่าเมื่อทำการวัดความหนาแน่นของอาร์กอนกึ่งเสถียรโดยการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 811.53 nm โดยใช้พลาสมาที่ผลิตด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน จะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จะเป็นฟังก์ชันของ integration time ที่ใช้ ซึ่งจะส่งผลให้ในการสำหรับการวัดค่าความหนาแน่นของอนุภาควัดด้วย สเปกโตรสโคปีแบบดูดกลืนแสงโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ รุ่น AvaSpec-2048 ของบริษัท Avantes ดังเช่นในการทดลองนี้เมื่อใช้ integration time ต่างกัน จะได้ค่าความหนาแน่นอาร์กอนกึ่งเสถียรที่ต่างกันทั้งที่วัดในพลาสมาที่ผลิตด้วยเงื่อนไขเดียวกันและผลการทดลองในคราวเดียวกันด้วย

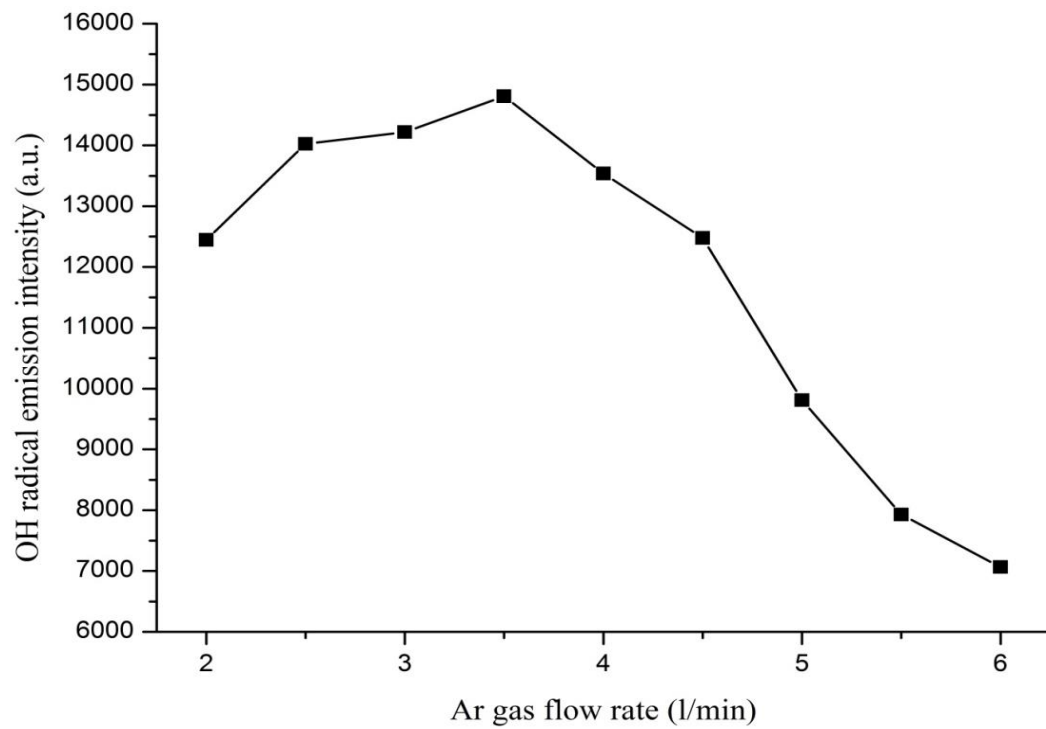
ชุดการทดลองเดียวกัน ซึ่งในทางที่ถูกต้องในวัดค่าความหนาแน่นของอนุภาคนั้นไม่ควรจะขึ้นกับค่า integration time ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

#### 4.3 ความหนาแน่นของอนุภาไฮดรอกซิลและไนตริกออกไซด์ในเจ็ทพลาสมาความดันบรรยากาศ

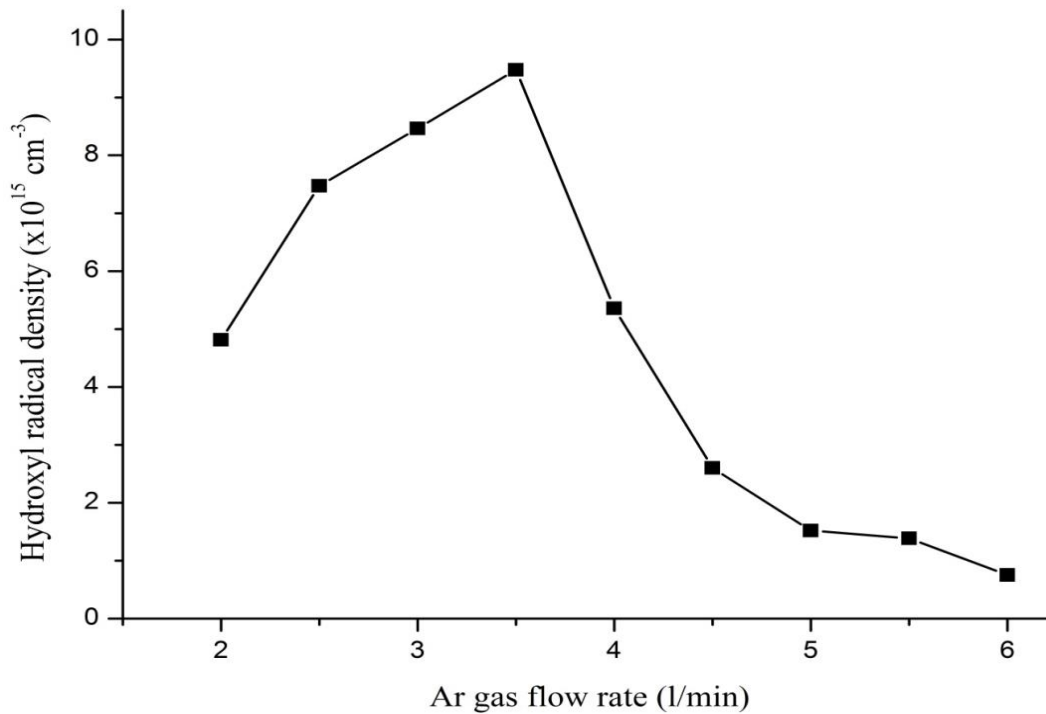
เมื่อทำการผลิตเจ็ทพลาสมาความดันบรรยากาศโดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซทำงานแล้วทำการวัดสเปกโทรสโคปีแบบเปล่ง OES ของเจ็ทพลาสมาที่บริเวณปลายท่อแก๊วของตัวอิเล็กทรอนิกส์ทรูดจากโปรไฟล์การแปลงแสงของเจ็ทพลาสมาในรูป 4.16 จะเห็นได้ว่าลำพลาสมาประกอบด้วยอนุภาไฮดรอกซิล กลุ่มของ  $N_2$  second positive system ( $N_2$  SPS) และกลุ่มของอาร์กอน และจากรูปที่ 4.17 พบว่าความเข้มแสงของอนุภาไฮดรอกซิลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราไหลของอาร์กอนเพิ่มขึ้นจากในช่วง 2.0 l/min จนมีค่าสูงสุดที่อัตราไหลที่ 3.5 l/min สอดคล้องกับผลจากการวัดสเปกโทรสโคปีแบบดูดกลืนยวี่ที่ความยาวคลื่น 308 nm ของ OH ที่อัตราไหลก๊าซอาร์กอนค่าต่างๆ ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งพบว่าอนุภาไฮดรอกซิลมีความเข้มข้นสูงเมื่อการไหลของอาร์กอนในช่วง 2.0 l/min ถึง 4.0 l/min โดยที่อัตราไหลของอาร์กอนเป็น 3.5 l/min พบว่าทำให้เกิดอนุภา OH มากที่สุด โดยอนุภานี้มีค่าความหนาแน่นสูงถึง  $7.90 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 4.16 โปรไฟล์การเปล่งแสงของเจ็ทพลาสมาความดันบรรยากาศที่อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 6.0 l/min

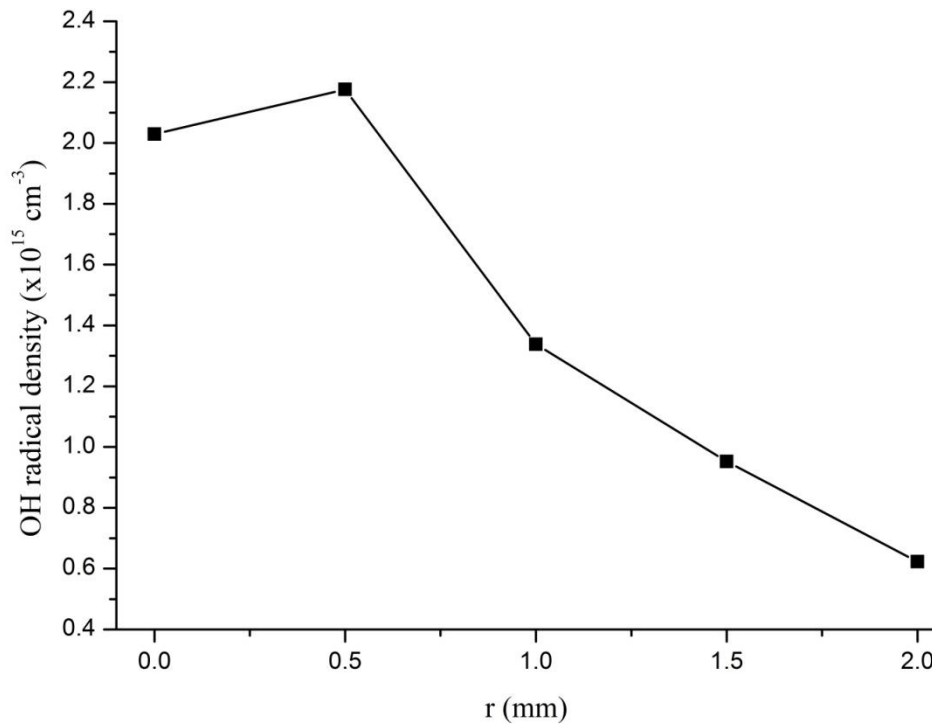


รูปที่ 4.17 ความเข้มแสงของอนุมูลไฮดรอกซิลในเจ็ดพลาสมาที่บริเวณปลายท่อแก้ว ที่อัตราไหลก๊าซอาร์กอนในช่วง 2.0 l/min ถึง 6.0 l/min



รูปที่ 4.18 ความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลในเจ็ดพลาสมาที่บริเวณปลายท่อแก้วที่อัตราไหลก๊าซอาร์กอนในช่วง 2.0 l/min ถึง 6.0 l/min

สำหรับผลของอัตราไหลก๊าซที่มีต่อความหนาแน่นของอนุมลไฮดรอกซิลในเจ็ทพลาสมาเย็น ความดันบรรยากาศนั้น เนื่องจากการเกิดอนุมล OH ในพลาสมาของอาร์กอนความดันบรรยากาศนี้เกิดจากการที่ไอน้ำถูกชนด้วยอิเล็กตรอนและอาร์กอนสถานะกึ่งเสถียร ซึ่งอัตราไหลก๊าซมีผลต่อปัจจัยเหล่านี้กล่าวคือ สำหรับไอน้ำที่อัตราไหลต่ำ ไอน้ำส่วนมากจะมาจากการที่ไอน้ำในอากาศแพร่เข้าไปพร้อมกับกลุ่มของก๊าซอาร์กอนที่ใช้เป็นก๊าซทำงานสามารถแพร่เข้าไปได้มาก แต่เมื่ออัตราไหลของก๊าซทำงานสูงขึ้นการแพร่ของไอน้ำจากบรรยากาศเข้าไปในกลุ่มของก๊าซอาร์กอนเกิดขึ้นได้น้อยลงทำให้ไอน้ำส่วนใหญ่ในกรณีที่มีอัตราไหลก๊าซอาร์กอนสูงมากๆ เป็นความชื้นที่มากับก๊าซอาร์กอน ซึ่งโดยปกติแล้วในถังก๊าซจะไม่มีไอน้ำอยู่เลย ผลของอัตราไหลของก๊าซทำงานต่อการแพร่ของไอน้ำจากอากาศเข้าไปพร้อมกับก๊าซทำงานนี้ได้รับการอธิบายโดย S. Yonemori และ R. Ono ในเอกสารอ้างอิง [17] แต่สำหรับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมานั้น พบว่าที่อัตราไหลต่ำจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนได้น้อย ซึ่งเกิดจากการที่มีจำนวนก๊าซทำงานไหลเข้าสู่บริเวณการดิสชาร์จช้า เมื่อเกิดการดิสชาร์จแล้วทำให้ได้จำนวนอิเล็กตรอนอิสระในปริมาตรของพลาสมามีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลต่อไปยังการเกิดของอาร์กอนสถานะกึ่งเสถียรที่เกิดจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมของก๊าซอาร์กอนซึ่งใช้เป็นก๊าซทำงาน ทำให้การเกิดอาร์กอนสถานะกึ่งเสถียรเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้ถึงแม้ว่าในสถานะที่อัตราไหลต่ำนี้จะมีไอน้ำอยู่ในกลุ่มก๊าซอยู่มาก แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนและอะตอมอาร์กอนสถานะกึ่งเสถียรอยู่น้อย จึงทำให้การเกิดอนุมลไฮดรอกซิล OH เกิดขึ้นได้น้อยทำให้มีความหนาแน่นต่ำ และเมื่ออัตราไหลสูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น พร้อม ๆ กับการลดลงของจำนวนไอน้ำ จนกระทั่งที่อัตราไหลที่เหมาะสมจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนในพลาสมามีจำนวนสูงที่สุดและเหมาะสมกับจำนวนไอน้ำที่อยู่ในกลุ่มก๊าซ ทำให้เกิดอนุมลไฮดรอกซิลที่มีความหนาแน่นมากที่สุด ซึ่งเมื่ออัตราไหลเพิ่มขึ้นอีกจะทำการเกิดอิเล็กตรอนลดน้อยลง เนื่องจากช่วงเวลาที่อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าหรือช่วงเวลาอิเล็กตรอนอยู่ในสนามไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อรวมกับผลที่เกิดกับจำนวนไอน้ำจากอากาศที่สามารถแพร่เข้าไปพร้อมกับก๊าซทำงานที่กำลังอยู่ ซึ่งลดลงเรื่อย ๆ ตามการไหลที่เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้การเกิดอนุมลไฮดรอกซิลมีค่าน้อยมากเมื่ออัตราไหลก๊าซมากกว่าอัตราไหลที่เหมาะสม ซึ่งผลของอัตราไหลของก๊าซอาร์กอนที่ใช้เป็นก๊าซทำงานต่อการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระในเจ็ทพลาสมาของอาร์กอนได้ถูกรายงานในการทดลองของ K.A. Aadim และคณะ [47] และ Y. June และคณะ [48] ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนในพลาสมามีความหนาแน่นมากขึ้นจนไปถึงค่าสูงสุดเมื่ออัตราไหลเป็นอัตราไหลที่เหมาะสม ก่อนที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะเริ่มลดลงเมื่ออัตราไหลมีค่าเกินค่าที่เหมาะสม



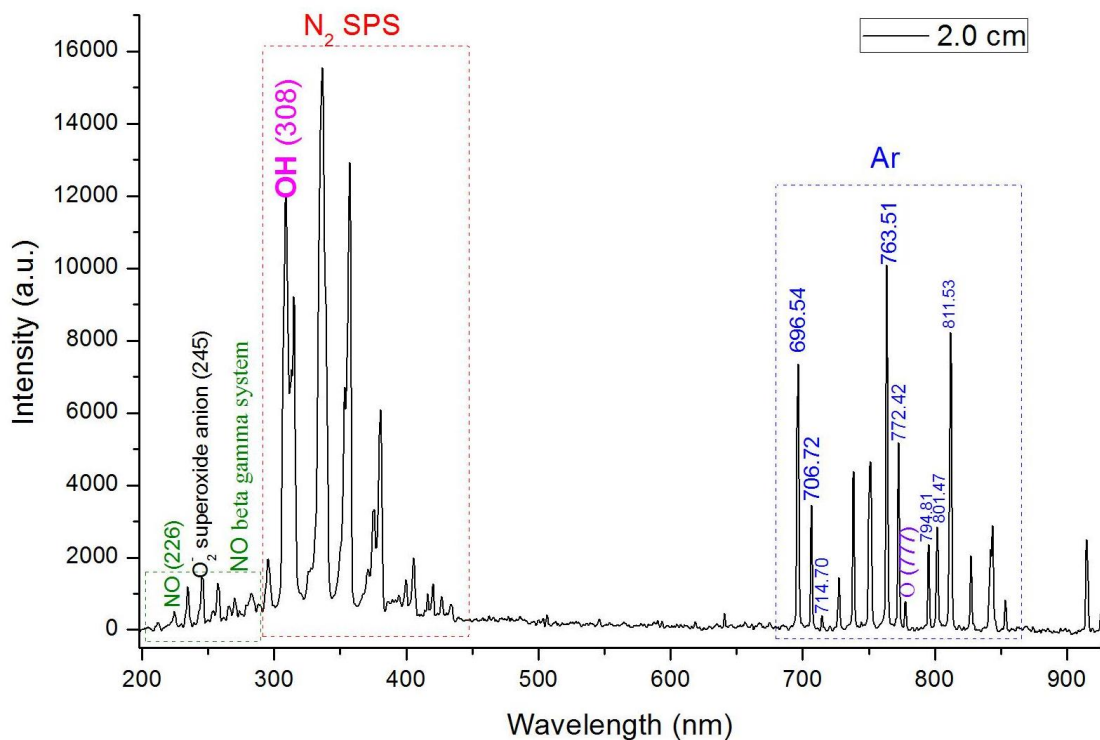
รูปที่ 4.19 ความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งต่างๆบนผิวกระจกที่ถูกประจุด้วยเจ็ทพลาสมาที่อัตราไหลก๊าซอาร์กอน 3.5 l/min

สำหรับที่อัตราไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 3.5 l/min ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของอนุมูลไฮดรอกซิล บนพื้นผิวของกระจกสไลด์โดยใช้การวัดสเปกโทรสโคปีแบบดูดกลืนแสงยูวี โดยทำการวัดตั้งแต่ระยะตามแนวรัศมี  $r = 0.0$  ถึง 2.5 mm พบว่าอนุมูล OH มีความหนาแน่นสูงที่สุดประมาณ  $2.17 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ที่ตำแหน่ง  $r = 0.5 \text{ cm}$  แล้วลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะตามแนวรัศมีที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ  $6.23 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  ที่ตำแหน่ง  $r = 2.0 \text{ mm}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ทั้งนี้เมื่อระยะห่างระหว่างปลายท่อแก้วและผิวกระจกมีค่าคงที่ อัตราไหลของก๊าซทำงานมีผลต่อการกระจายตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลบนผิวกระจก กล่าวคือ เมื่ออัตราไหลเพิ่มขึ้น ตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของอนุมูลสูงสุดจะขยับออกจากตำแหน่งศูนย์กลางมากขึ้น ทำให้บริเวณที่มีความหนาแน่นอนุมูลสูงสุดมีลักษณะเป็นวงแหวนรอบจุดศูนย์กลาง [17] สอดคล้องกับการทดลองนี้ที่พบว่าอนุมูลไฮดรอกซิลที่อัตราไหล 3.5 l/min มีความหนาแน่นมากที่สุดตรงตำแหน่ง  $r = 0.5 \text{ mm}$  ไม่ใช่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของรัศมี

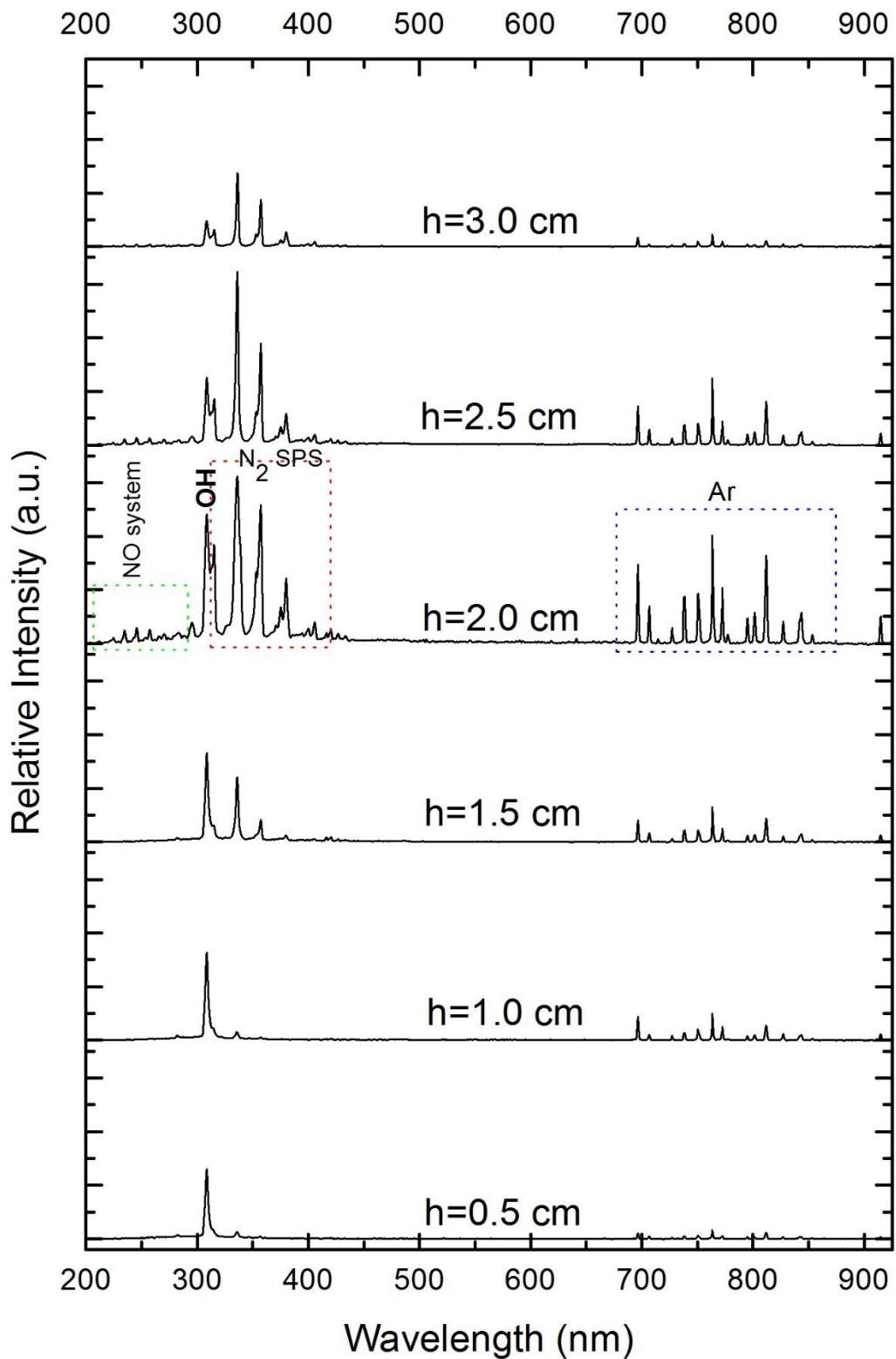
จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 จะสังเกตได้ว่าที่เงื่อนไขการผลิตพลาสมาเดียวกัน และมีอัตราไหลก๊าซอาร์กอน 3.5 l/min เหมือนกัน ความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่วัดที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของ

กลุ่มพลาสมา ( $r = 0.0$ ) มีค่าที่แตกต่างกัน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการที่ทั้ง 2 การทดลองได้ทำการวัดที่ตำแหน่งและช่วงเวลาต่างกัน คือ ผลการทดลองในรูปที่ 4.18 ได้ทำการวัดความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่บริเวณปลายท่อแก้วของตัวอิเล็กทรอนิกส์ ในขณะที่ผลการวัดในรูปที่ 4.19 เป็นการวัดความหนาแน่นของอนุมูลไนตริกออกไซด์บนพื้นผิวกระจกสไลด์ที่ถูกประจุด้วยเจ็ทพลาสมา นอกจากนี้เมื่อทำการวัดในช่วงเวลาที่ต่างกัน ทำให้มีไอน้ำในอากาศมีจำนวนมากขึ้นน้อยต่างกันไป กล่าวคือ ผลการทดลองในรูปที่ 4.18 ทำการทดลองในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 65.0 % ในขณะที่ผลการทดลองในรูปที่ 4.19 ทำการทดลองในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60.0 % ซึ่งปริมาณไอน้ำในอากาศมีผลโดยตรงกับจำนวนอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้น นอกเหนือจากนี้ยังมีผลของเวลาในการเก็บรวบรวมแสงของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (integration time) มาเกี่ยวข้องด้วย โดยผลการทดลองในรูปที่ 4.18 ใช้เวลา integration time ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 900 ms ในขณะที่ผลการทดลองในรูปที่ 4.19 ใช้ integration time เท่ากับ 800 ms

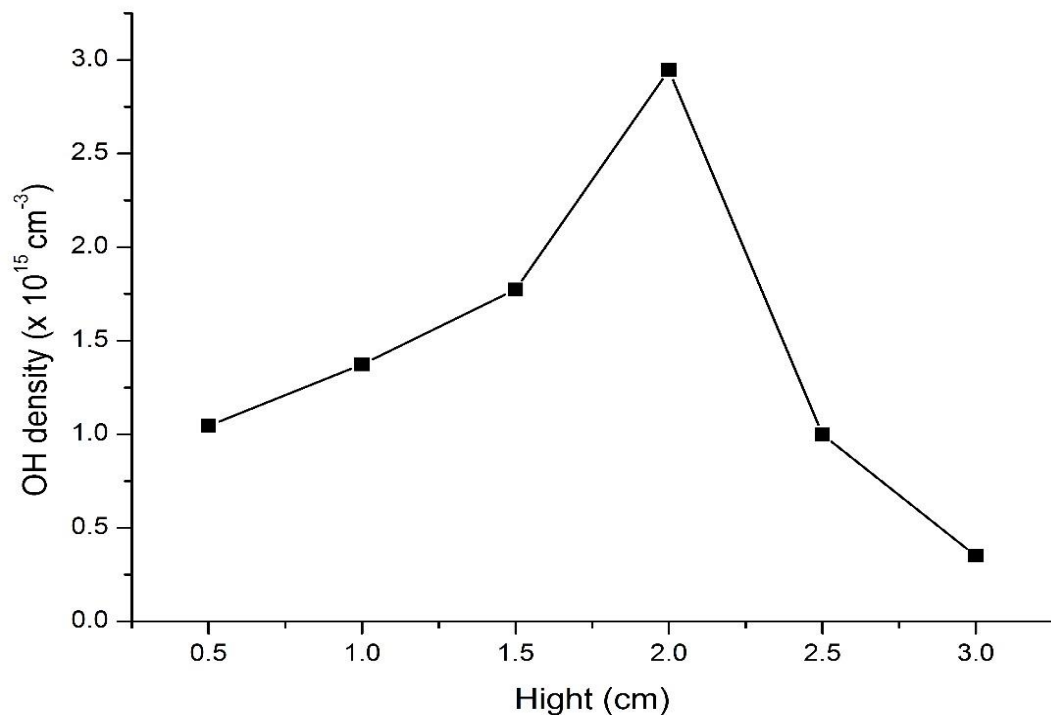


รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมาที่อยู่บริเวณเหนือผิวน้ำที่ถูกประจุด้วยเจ็ทพลาสมาความดันบรรยากาศ

โปรไฟล์การเปล่งแสงของพลาสมาที่อยู่บริเวณเหนือผิวน้ำที่ถูกประยุกต์ด้วยเจ็ทพลาสมาความดันบรรยากาศของอาร์กอนที่อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 6.0 l/min โดยความสูงของปลายท่อแก้วจากผิวน้ำเท่ากับ 2.0 cm แสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งกลุ่มพลาสมาบนผิวน้ำนี้ประกอบด้วย อนุมูลไฮดรอกซิล (OH) กลุ่มของ  $N_2$  second positive system กลุ่มของอาร์กอน อะตอมออกซิเจน กลุ่มของ NO  $\beta\gamma$  system ซึ่งรวมถึงอนุมูลไนตริกออกไซด์ (NO) ด้วย และ superoxide anion ( $O_2^-$ ) ซึ่งจากรูปที่ 4.20 รวมถึงรูปที่ 4.21 ทำให้ทราบว่ากลไกการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลนั้นโดยส่วนมากแล้วเกิดจากการชนกันระหว่างไอออนกับอะตอมอาร์กอนกึ่งเสถียร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความสูงของปลายท่อแก้วจากผิวน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.5 cm ไปจนถึง 2.0 cm ความเข้มแสงของกลุ่มของอาร์กอน โดยเฉพาะกลุ่มของอาร์กอนกึ่งเสถียรเพิ่มขึ้น ความเข้มแสงจากอนุมูล OH ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และความสูง 2.0 cm ความเข้มแสงของกลุ่มอาร์กอนกึ่งเสถียรมีค่าสูงสุด ทำให้ความเข้มแสงของ OH มีค่าสูงสุดตามไปด้วย ในขณะเดียวกันที่ความสูงนี้ยังทำให้เกิดกลุ่ม  $N_2$  second positive system อะตอมออกซิเจน และ superoxide anion ( $O_2^-$ ) ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการเกิด NO ต้องอาศัยการชนกันระหว่างอะตอมโมเลกุลหรือสารประกอบของไนโตรเจนและออกซิเจน ทำให้ที่ความสูงนี้ทำให้เกิดกลุ่มของ NO  $\beta\gamma$  system ซึ่งรวมถึงอนุมูลไนตริกออกไซด์ (NO) ตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามอนุมูลไนตริกออกไซด์ที่เกิดขึ้นยังมีจำนวนมากไม่เพียงพอสำหรับการวัดความหนาแน่นของอนุมูลโดยสเปกโทรสโกปีแบบดูดกลืนยูวีด้วยชุดอุปกรณ์ที่มีอยู่และจากการทดลองนี้ทำให้เห็นว่าปัจจัยในการทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและอนุมูลไนตริกออกไซด์บนผิวน้ำโดยใช้เจ็ทพลาสมาความดันบรรยากาศ นอกเหนือจากจะต้องพิจารณาอัตราไหลของก๊าซอาร์กอนหรือก๊าซทำงานแล้ว ยังต้องพิจารณาความสูงที่เหมาะสมระหว่างปลายท่อแก้วของตัวอิเล็กโทรดกับผิวน้ำ

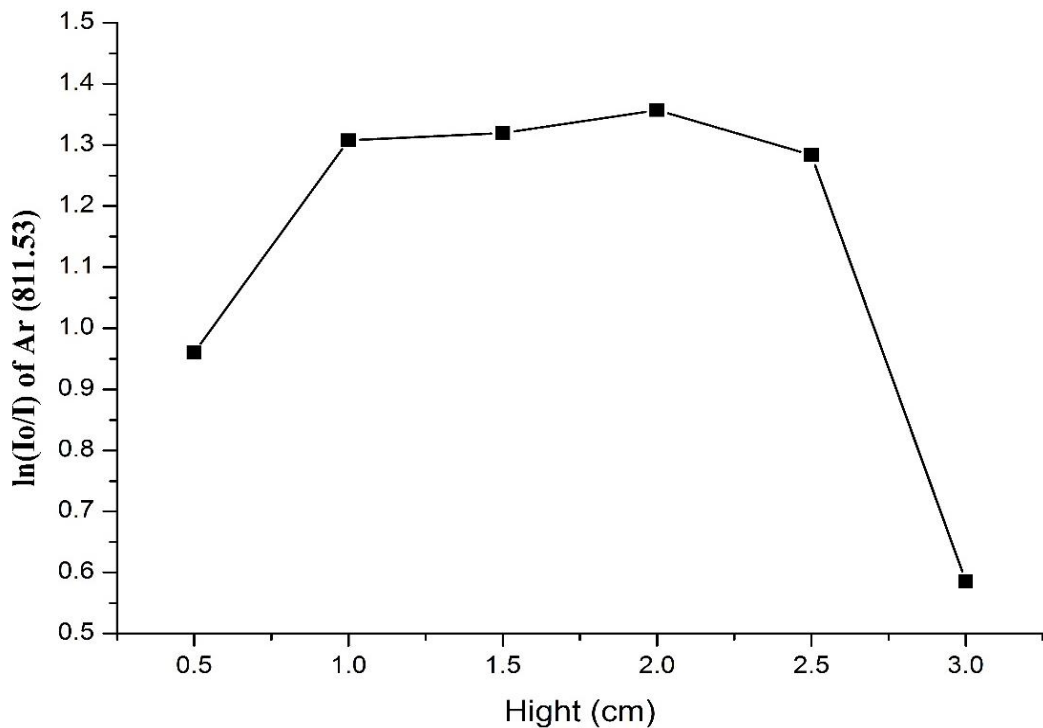


รูปที่ 4.21 โพรไฟล์การเปล่งแสงของพลาสมาที่อยู่บริเวณเหนือผิวน้ำที่ถูกประยุต์ด้วยเจ็ทพลาสมา ความดันบรรยากาศของอาร์กอนที่อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 6.0 l/min เมื่อความสูง (h) ของปลายท่อแก๊วเล็กโตรดอยู่สูงจากผิวน้ำที่ระดับต่างๆ



รูปที่ 4.22 ความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่บริเวณเหนือผิวน้ำที่ถูกประยุต์ด้วยเจ็ทพลาสมา ความดันบรรยากาศของอาร์กอนที่อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 6.0 l/min เมื่อความสูงของปลายท่อแก้วอิเล็กโทรดอยู่สูงจากผิวน้ำที่ระดับต่างๆ

เมื่อทำการวัดความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิล OH ที่อยู่บนผิวน้ำที่ถูกประยุต์ด้วยเจ็ทพลาสมาเย็นอาร์กอนความดันบรรยากาศโดยอัตราไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 6 l/min โดยทำการทดลองในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 45.0 % และในการเก็บข้อมูลใช้เวลา integration time เท่ากับ 250 ms เมื่อความสูงของปลายท่อแก้วของตัวอิเล็กโทรดจากผิวน้ำมีค่าตั้งแต่ 0.5 cm ถึง 3.0 cm พบว่าความหนาแน่นของอนุมูล OH บนผิวน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจาก 0.5 cm ไปจนถึงความสูง 1.5 cm และอนุมูลไฮดรอกซิลมีค่าความหนาแน่นสูงสุดเมื่อความสูงของปลายท่อแก้วเป็น 2.0 cm โดยมีความหนาแน่นประมาณ  $2.90 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลของสเปกโทรสโคปีแบบเปล่งแสงแสดงในรูปที่ 4.21 และยังสอดคล้องกับผลการวัดสเปกโทรสโคปีแบบดูดกลืนแสงเพื่อหาความหนาแน่นของอาร์กอนกึ่งเสถียรโดยใช้การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 811.53 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งจะเห็นว่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 811.53 nm ของอนุมูล OH มีค่ามากขึ้นเมื่อความสูงของปลายท่อแก้วจากผิวน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.5 cm ไปจนถึงความสูง 1.5 cm และการดูดกลืนมีค่าสูงสุดเมื่อความสูงของปลายท่อแก้วเป็น 2.0 cm ข้อมูลในรูปที่ 4.23 นี้ทำการทดลองในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 45.0 % และในการเก็บข้อมูลใช้เวลา integration time เท่ากับ 2000 ms



รูปที่ 4.23 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 811.53 nm ของกลุ่มอะตอมอาร์กอนกึ่งเสถียรที่อยู่บนผิวน้ำที่ถูกประยุกต์ด้วยเจ็ทพลาสมา เมื่อความสูงของปลายท่อแก้วอยู่สูงจากผิวน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 cm ถึง 3.0 cm

อย่างไรก็ตามในการทดลองหาความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลและอาร์กอนกึ่งเสถียร พบปัญหา คือ การวัด OH และ Ar โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงคนละอัน จึงทำให้ต้องวัดความหนาแน่นให้เสร็จทีละอนุมูลทำให้พลาสมาที่ผลิตได้แต่ละครั้งอาจจะไม่เหมือนกันอย่างสมบูรณ์หรืออาจจะต่างกันเล็กน้อยนั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลโดยสเปกโทรสโคปีแบบดูดกลืนยูวีในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของกลุ่มผู้วิจัยอื่นซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าผลการวัดความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลในพลาสมาจากหัวเมดพลาสมาและพลาสมาจากพลาสมาเจ็ทความดันบรรยากาศในการทดลองนี้อยู่ใน order ของ  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลในพลาสมาความดันบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่ทดลองโดยผู้วิจัยอื่นๆ

| Researchers              | Plasma Jet Condition                                       | OH density (cm <sup>-3</sup> ) |
|--------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Hong et al. [16]         | Ar needle-typed, 15 w, f=22kHz, gas flow rate 100-500 sccm | $2.6 \times 10^{15}$           |
| Srivastava et al.[49]    | Ar-H <sub>2</sub> O plasma jet, $\mu$ wave 104 w           | $(0.2-51.3) \times 10^{15}$    |
| Li et al.[14]            | Ar-H <sub>2</sub> O plasma jet, 10 w, f=13.56 MHz          | $1.15 \times 10^{14}$          |
| T. Verreycken et al.[51] | Ar-H <sub>2</sub> O rf plasma jet                          | $(0.1-2.5) \times 10^{15}$     |
| Y.Hee et al.[15]         | Ar plasma jet, 4.9 w                                       | $2.6 \times 10^{15}$           |
| Kalghatgi et al.[52]     | DBD plasma                                                 | $10^{15}-10^{17}$              |

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved