

การกระจายของค่าความดันสุญญากาศในวงแหวนกักเก็บของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ^{1*} และ ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล^{2,3}

Wongkokua, W.^{1*} and Songsiririthigul, P.^{2,3} (2002). Distribution of Vacuum Pressure in the Storage Ring of the Siam Photon Source. *Suranaree J. Sci. Technol.* 9:205-211.

Abstract

This report explains the vacuum system of the electron storage ring of the Siam Photon Source, and describes the theoretical method to calculate the base vacuum pressure in the storage ring. The theoretical vacuum pressures in the ring obtained from the calculations are in the range of 10^{-11} to 10^{-10} Torr. The results from the calculations are found to be in good agreement with the measured values.

บทคัดย่อ

รายงานนี้อธิบายถึงระบบสุญญากาศของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม และอธิบายวิธีการทฤษฎีที่ใช้คำนวณความดันสุญญากาศในวงแหวนกักเก็บในขณะที่ไม่มีการกักเก็บอิเล็กตรอน ความดันสุญญากาศในวงแหวนกักเก็บที่คำนวณได้ตามทฤษฎีอยู่ในช่วง 10^{-11} ถึง 10^{-10} ทอร์ ผลการคำนวณสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดเป็นอย่างดี

บทนำ

สุญญากาศมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน สุญญากาศในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนทำให้โอกาสที่จะเกิดการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของอากาศลดลง การที่อิเล็กตรอนชนกับโมเลกุลทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ซึ่งจะส่งผลให้กระแสของอิเล็กตรอนในวงแหวน

กักเก็บมีปริมาณลดลง นอกเหนือจากนั้นการชนดังกล่าวอาจจะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับรังสีที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของอากาศหรือระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของท่อหรือห้องสุญญากาศ (vacuum ducts หรือ vacuum chambers) ระบบสุญญากาศจึง

¹ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ. นครราชสีมา 30000.

² Ph.D., อาจารย์สาขาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

³ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

เป็นระบบหลักที่สำคัญของวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์

รายงานนี้อธิบายส่วนประกอบหลักของวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม(ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล และคณะ, 2542; สำเนาผดุงเสนาะ, 2539) และแสดงถึงวิธีการคำนวณหาค่าความดันสุญญากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ วงแหวนกักเก็บดังกล่าว และยังมีผลการแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและค่าความดันของสุญญากาศที่สร้างได้โดยที่มงานด้านสุญญากาศของฝ่ายเครื่องเร่งอนุภาค ห้องปฏิบัติการแสงสยาม

ทฤษฎี

ความดันในระบบสุญญากาศ (P) เกิดจากการที่โมเลกุลของอากาศมีการเคลื่อนที่และมีการชนกับผนังภาชนะ ปริมาณความดันสามารถหาได้จากค่านิยามในวิชากลศาสตร์ คือแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเนื่องจากการชนของโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศของแรงดังกล่าว ในระบบสุญญากาศใด ๆ เราสามารถคำนวณหาค่าความดันได้เมื่อเราทราบปริมาณของอากาศที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา \dot{m} ที่ค่าความดันสุญญากาศนั้น (Q) และอัตราเร็วของการปั๊ม (pumping speed) เพื่อเอาอากาศออกจากระบบ (S) ตามความสัมพันธ์

$$p = \frac{Q}{S} \quad (1)$$

โดยทั่วไปแล้วปั๊ม (pump) จะติดตั้งเข้ากับห้องสุญญากาศ โดยมีท่อสุญญากาศเชื่อมอยู่ตรงกลาง จึงทำให้อัตราเร็วยังผลของปั๊ม (effective pumping speed), S_e มีค่าลดลง สำหรับอัตราเร็วยังผลของปั๊มสุญญากาศในห้องสุญญากาศสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ $1/S_e = 1/S + 1/C$ เมื่อ C คือค่าบ่งบอกสภาพนำอากาศของท่อสุญญากาศ (conductance) ที่เชื่อมต่อระหว่างปั๊มสุญญากาศกับห้องสุญญากาศ ค่า C ของท่อสุญญากาศที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมหาได้จากสมการ

$$c = 3.81 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{d^3}{l} \quad (2)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K), M คือมวลโมลาร์ของอากาศ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อสุญญากาศ และ l คือความยาวของท่อสุญญากาศ (Berman, 1992)

ในกรณีที่มีการต่อท่อสุญญากาศเชื่อมระหว่างห้องสุญญากาศดังแสดงในรูปที่ 1 ค่าความดันของสุญญากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อสุญญากาศมีค่าที่แตกต่างกัน เราสามารถคำนวณหาการกระจายของค่าความดันโดยการประมาณให้ค่าความดันทุกตำแหน่งในแต่ละห้องสุญญากาศมีค่าเท่ากัน และโดยการพิจารณาว่าการไหลของอากาศในท่อสุญญากาศมีความต่อเนื่อง ในกรณีที่พิจารณาในระบบสุญญากาศที่โมเลกุลของอากาศในระบบเกิดขึ้นจากการ outgassing ของวัสดุที่นำมาใช้ทำห้องสุญญากาศและท่อสุญญากาศเพียงอย่างเดียว (Hablanian, 1997) ค่าความดันที่ตำแหน่งใด ๆ ในท่อสุญญากาศสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$P_x = qnD \left(\frac{-x^2}{2c_m x_m} + \frac{x}{c_m} \right) + P_i \quad (3)$$

โดยที่ D คือเส้นรอบวงของท่อสุญญากาศ และ c_m คือสภาพนำของท่อสุญญากาศที่มีความยาวเท่ากับ x_m ซึ่งเป็นตำแหน่งสมมูลการไหลของโมเลกุลของอากาศระหว่างห้องสุญญากาศที่มีความดันสุญญากาศ P_i และ P_{i+1} ส่วน q คือค่า outgassing rate ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันสำหรับวัสดุต่างชนิดกัน

เมื่อท่อสุญญากาศที่เชื่อมต่อระหว่างห้องสุญญากาศมีความยาวไม่เท่ากัน และแต่ละห้องสุญญากาศมีพื้นที่ผิวไม่เท่ากัน การคำนวณค่าความดันสุญญากาศในห้องสุญญากาศ สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (1) โดยที่ Q คือปริมาณของอากาศภายในห้องสุญญากาศรวมกับปริมาณของอากาศภายในท่อสุญญากาศจนถึงตำแหน่งสมมูลการไหลของอากาศ ทั้งสองด้านของห้องสุญญากาศ ค่าความดันสุญญากาศในห้องสุญญากาศ i คือ P_i หาได้ตามความสัมพันธ์แสดงโดยสมการที่ (4) ส่วนตำแหน่งสมมูลการไหลของอากาศภายในท่อสุญญากาศ สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (3) ได้ผลดังสมการที่ (5)

time ที่ยาวเพียงพอสำหรับการทดลองที่ใช้แสงซินโครตรอน

ท่อและห้องสุญญากาศของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยามอาจแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ 1) ส่วนที่เป็นห้องสุญญากาศบริเวณ bending magnet 2) ส่วนที่เป็นห้องสุญญากาศในแนวตรง และ 3) ส่วนที่เป็นห้องสุญญากาศของ RF acceleration cavity และของ Septum magnet โดยที่ทั้งสามส่วนได้ถูกออกแบบให้ต่อเชื่อมเข้าด้วยกันเป็นวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนตามแบบที่แสดงในรูปที่ 2 (IHI, 1999)

ห้องสุญญากาศบริเวณ bending magnet มีอยู่สองแบบ โดยมีแบบละ 8 ชิ้น ห้องสุญญากาศทั้งสองแบบทำจากอลูมิเนียมผสม A5083-0 เพราะว่าอลูมิเนียมผสมดังกล่าวมีคุณสมบัติที่ดีในการนำความร้อนและยังมีค่า outgassing rate ที่ต่ำ รูปแบบของห้องสุญญากาศทั้งสองแบบแสดงในรูปที่ 3 ข้อแตกต่างที่ชัดเจนของห้องสุญญากาศทั้งสองคือทิศทางและตำแหน่งของช่องที่ปล่อยให้แสงซินโครตรอนเล็ดรอดออกมาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ รูปที่ 3(a) เป็นห้องสุญญากาศที่จะนำแสงซินโครตรอนผลิตจาก bending magnet มาใช้งาน ส่วนห้องสุญญากาศที่แสดงในรูปที่ 3(b) ถูกออกแบบเพื่อให้แสงซินโครตรอนที่ผลิตจาก insertion devices ปล่อยออกมาใช้ประโยชน์

ลักษณะที่เด่นของห้องสุญญากาศที่อยู่ในบริเวณ bending magnet นี้คือการที่มีการติดตั้งแผ่น titanium ในห้องสุญญากาศตลอดตามแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อใช้เป็นขั้ว cathode และ anode ของ ion pump โดยที่ ion pump ดังกล่าวจะทำงานได้เฉพาะตอนที่มีการใช้งาน bending magnet โดยทั่วไปนิยมเรียก ion pump ดังกล่าวไว้ว่า Distributed Ion Pump (DIP) ความจำเป็นที่ต้องติดตั้ง ion pump ในลักษณะดังกล่าวเพื่อที่จะให้ค่าอัตราเร็วยังผลของการ pumping มีค่าที่สูงเพียงพอที่จะกำจัดโมเลกุลของก๊าซที่ถูกกระตุ้นให้ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุของห้องสุญญากาศเนื่องจากการที่แสงซินโครตรอนไปตกกระทบ การที่แสงซินโครตรอนไปตกกระทบด้านนอกของผนังภายในของห้องสุญญากาศทำให้เกิด

ความร้อนขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นจึงมีการหล่อเย็นห้องสุญญากาศบริเวณที่มีการตกกระทบของแสงซินโครตรอนดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างของท่อสุญญากาศที่ติดตั้งในส่วนตรงของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นส่วนที่มีการติดตั้ง quadrupole magnets, sextupole magnets, steering magnets ตลอดจน insertion devices ชนิดต่าง ๆ ที่จะติดตั้งในอนาคต

นอกเหนือไปจาก DIPs การรักษาสภาพสุญญากาศในวงแหวนกักเก็บอาศัยปั๊มชนิดที่เรียกว่า Titanium Sublimation Pump (TSP), Non-Evaporated Getter Pump (NEG) และ Sputter Ion Pump (SIP) ในวงแหวนกักเก็บมีการใช้งาน SIP เป็นจำนวน 10 ชุด แต่ละชุดมีค่าอัตราเร็วของการปั๊ม บ่งบอกในรูปที่ 2 การทำงาน SIP ดังกล่าวจะทำงานตลอดเวลา ส่วน NEG และ TSP จะถูกใช้งานเป็นช่วง ๆ โดยที่ความถี่ของการใช้งานขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบสุญญากาศ

ค่าความดันสุญญากาศในระดับ UHV ของวงแหวนกักเก็บสามารถวัดได้จาก vacuum pressure gauges หรือวัดจาก quadrupole mass spectrometer (QMS) การวัดค่าความดันโดยอาศัย QMS จะทำให้เราทราบถึงสัดส่วนของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบ สำหรับ gauge ที่ใช้ในระบบสุญญากาศของวงแหวนกักเก็บของเครื่องกำเนิดแสงสยามมีอยู่สองชนิดคือ Cold Cathode Gauge (CCG) และ Nude Ionization Gauge (NIG)

ความดันสุญญากาศ

รูปที่ 5 แสดงค่าความดันสุญญากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม และตำแหน่งของชิ้นส่วนที่สำคัญของระบบสุญญากาศของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน เช่น bending magnet, SIP, NEG และ vacuum pressure gauge ค่าความดันสุญญากาศที่แสดงในกราฟเป็นค่าความดันสุญญากาศในช่วงที่ยังไม่มีการกักเก็บอิเล็กตรอนในวงแหวนกักเก็บจากการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีที่ได้อธิบายในตอนที่ผ่านมาเปรียบเทียบกับค่าความ

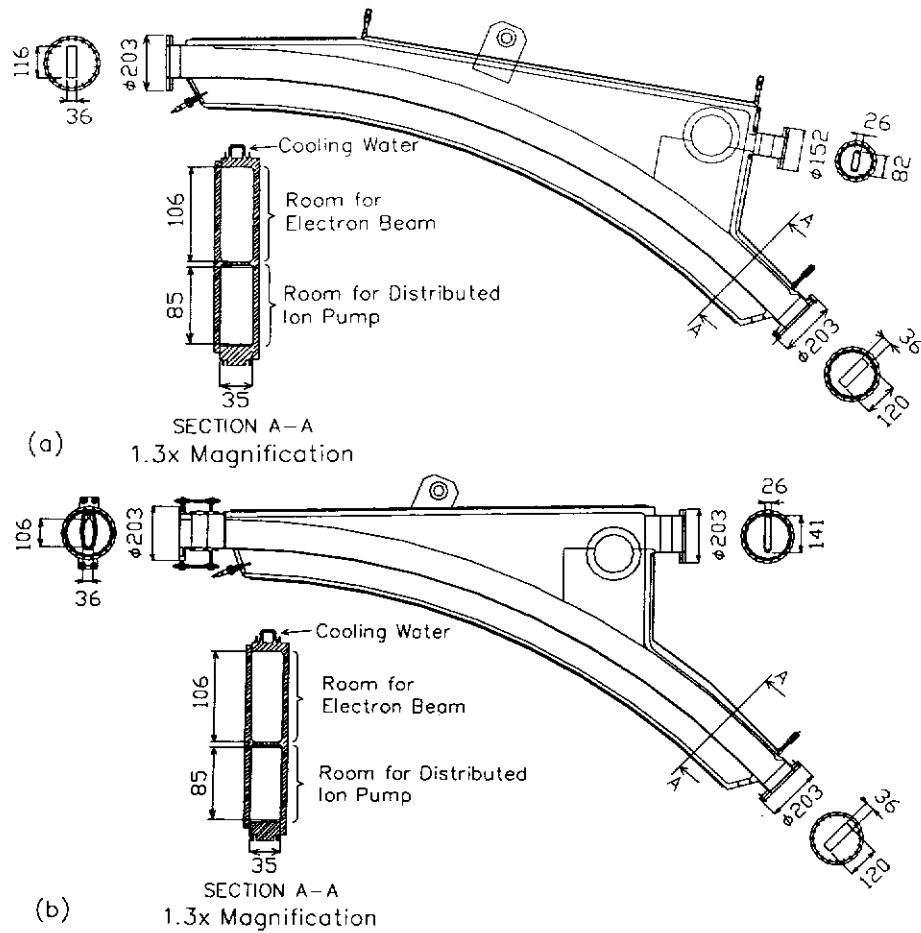


Figure 3. Vacuum chambers installed at (a) the bending magnets BM2, BM4, BM6 and BM8 and at (b) the bending magnets BM1, BM3, BM5 and BM7 of the storage ring of the Siam Photon Source.

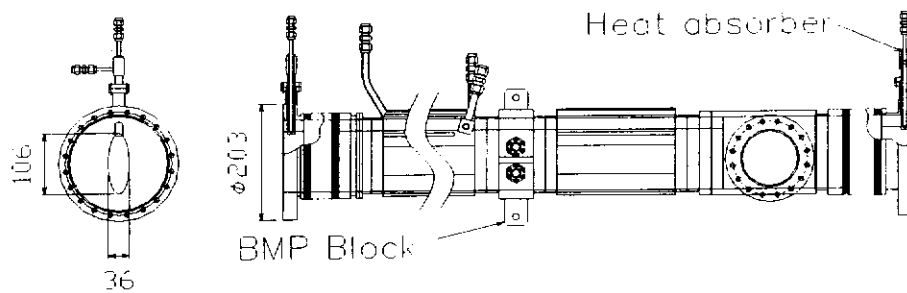


Figure 4. An example of the vacuum chambers installed in the straight sections of the storage ring of the Siam Photon Source.

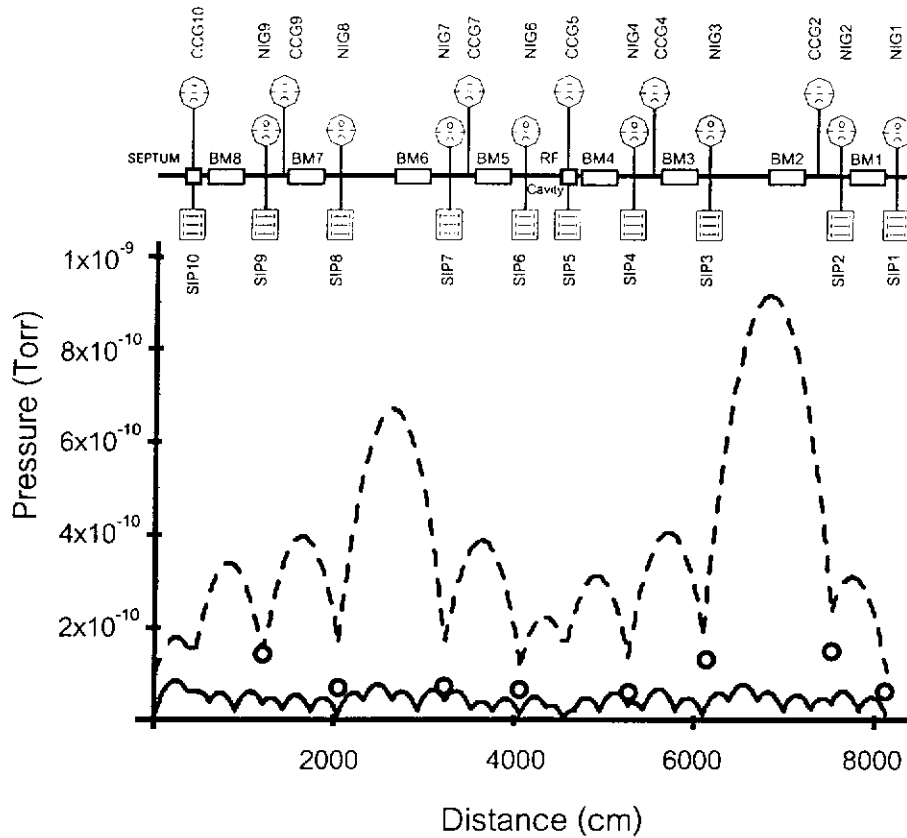


Figure 5. Vacuum pressure obtained from the calculations when only SIPs are operated (dashed) and when SIPs,NEG and TSP are operate (solid line). The values of the measured vacuum pressure are indicated by the open circles. The positions of different pumps and gauges are show on top of the graph.

คั้นสุญญากาศที่สร้างได้จริงโดยที่มงานของฝ่ายเครื่องเร่งอนุภาคของห้องปฏิบัติการแสงสยาม

ข้อมูลที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ ค่า outgassing rate ของโลหะที่ใช้ทำชิ้นส่วนสุญญากาศ คือ อลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 1×10^{-12} torr liters s^{-1} cm^{-2} (IHI, 1999) เพื่อไม่ให้เกิดความซับซ้อนในการคำนวณ ได้มีการประมาณค่าสภาพความนำท้อสุญญากาศโดยพิจารณาว่าภาคตัดขวางของท้อสุญญากาศทั้งหมดรวมทั้งห้องสุญญากาศในส่วน bending magnet มีลักษณะเป็นรูปวงรี โดยมีค่าความยาวแกนหลักและค่าความยาวแกนรองของวงรีเท่ากับ $a=10.6$ cm และ

$b=3.6$ cm ตามลำดับ การประมาณดังกล่าวทำให้พื้นที่ผิวของผนังห้องสุญญากาศในบริเวณ bending magnet มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามในการพิจารณาปริมาณก๊าซที่ออกมาจากห้องสุญญากาศดังกล่าวได้มีการทดแทนปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ที่ขาดหายไป ส่วนค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณคือ 298 K ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณของอุณหภูมิห้อง และค่ามวลโมเลกุลของอากาศที่ใช้คือ 28.98 g/mol (Berman, 1992)

ค่าความดันสุญญากาศที่ได้จากการคำนวณ มีการพิจารณาอยู่สองกรณีคือ 1) กรณีที่มีการทำงาน

ของ SIP เพียงอย่างเดียวในการสร้างสุญญากาศในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณในกรณีนี้แสดงเป็นกราฟเส้นประ และ 2) กรณีที่มีการของปั๊มทั้งสามชนิดคือ SIP, NEG และ TSP ค่าความดันสุญญากาศแสดงเป็นกราฟเส้นทึบ ส่วนค่าที่วัดได้โดยใช้ vacuum pressure guage ชนิด NIG แสดงเป็นรูปเครื่องหมายวงกลม

ค่าความดันของสุญญากาศที่คำนวณได้ทั้งสองกรณีสอดคล้องกับความเป็นจริงที่ว่าค่าความดันสุญญากาศที่คำนวณได้มีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งของท่อสุญญากาศหรือห้องสุญญากาศที่เชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศ และจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งสมดุลการไหลของโมเลกุลของอากาศ เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการทำงานเฉพาะ SIP เพียงอย่างเดียว พบว่าค่าความดันสุญญากาศในวงแหวนกักเก็บ ณ ตำแหน่งที่มี NIG มีค่าอยู่ในย่านของ 10^{-10} Torr เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง ณ ตำแหน่งที่มีการวัดพบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงเพียงเล็กน้อย ผลการคำนวณสอดคล้องกับความเป็นจริงเนื่องจากว่าสุญญากาศที่สร้างได้จริงเกิดจากการทำงานทั้งของ SIP ที่ทำงานตลอดเวลาและของ TSP ที่ทำงานเป็นช่วง ๆ แต่เมื่อมีการพิจารณาว่ามีการทำงานเฉพาะของ SIP เพียงอย่างเดียวทำให้ค่าอัตราการเร็วของการปั๊มมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง จึงส่งผลให้ค่าที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริง

เมื่อมีการพิจารณาการทำงานของปั๊มทั้งสามชนิดคือ SIP, NEG และ TSP ซึ่งเป็นการทำนายค่าความดันของสุญญากาศต่ำสุดที่สามารถที่จะสร้างได้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน จากผลการคำนวณพบว่าค่าความดันสุญญากาศมีค่าอยู่ในย่านของ 10^{-11} Torr เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง ณ ตำแหน่งที่มีการวัดพบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นเราอาจจะสามารถประมาณได้ว่าค่าที่คำนวณได้ดังกล่าวเป็นค่าความดันของสุญญากาศต่ำสุดที่สามารถที่จะสร้างได้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน

จากการศึกษาสรุปได้ว่าความดันสุญญากาศ

ของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยามที่ได้จากการคำนวณมีค่าสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง ซึ่งอยู่ในช่วง 10^{-11} - 10^{-10} Torr ความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยของค่าที่คำนวณได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงอาจเกิดจากปัจจัยหลักได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของการคิดค่า outgassing และความคลาดเคลื่อนของค่าความเร็วของการปั๊ม

คำขอขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร. สวโรช รุจิรวรรณ และทีมงานด้านสุญญากาศของฝ่ายเครื่องเร่งอนุภาค สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับระบบสุญญากาศของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

เอกสารอ้างอิง

- ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล และคณะ. (2542). เครื่องกำเนิดแสงสยาม. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 6:22-31.
- สำเนาภาคิเสนะ. (2539). เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องแรกของประเทศไทย. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 3:57-61
- Berman, A. (1992). Vacuum Engineering Calculations, Formulas, and Solved Exercises. Academic Press, Inc., California.
- Hablanian, M.H. (1990). High-Vacuum Technology A Practical Guide. Marcel Dekker, Inc., New York.
- IHI (1999). Technical Specification of Vacuum Components for Siam Photon Storage Ring. Ishikawajima-Harima Heavy Industry Co. Ltd., Japan.