รหัสโครงการ SUT1-105-58-24-03

รายงานการวิจัย

การศึกษาโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ในระบบติดตามภายในของหัววัดอลิซที่ปรับปรุงใหม่

(Study of structures and materials used in the upgraded inner tracking system of ALICE)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT1-105-58-24-03

รายงานการวิจัย

การศึกษาโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ในระบบติดตามภายในของหัววัดอลิซที่ปรับปรุงใหม่

(Study of structures and materials used in the upgraded inner tracking system of ALICE)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิโนรัตน์ กอบเดช

สาขาวิชาฟิสิกส์
สำนักวิชาวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อายุทธ ลิ้มพิรัตน์

อาจารย์ วันเฉลิม พูนสวัสดิ์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2562

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2558 หมายเลขโครงการวิจัย SUT1-105-58-24-03 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ Dr. Lucaino Musa Dr. Mario Sitta ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านฟิสิกส์พลังงานสูงและฟิสิกส์ดาราศาสตร์ ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ทฤษฎี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทีมนักวิจัยในโครงการระบบติดตามทางเดินอนุภาคที่ปรับปรุงใหม่ของหัววัดอลิซมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย
กันยายน 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของการร่วมมือกันของห้องปฏิบัติการอลิซ คือการศึกษาฟิสิกส์ของสสารที่มีปฏิสัมพันธ์อย่างเข้ม โดยใช้ผลการทดลองจากเครื่องตรวจจับไอออนหนัก Inner Tracking System (ITS) ซึ่งตั้งอยู่ในใจกลางของหัววัดอลิซล้อมรอบจุดที่เกิดการชนกันของอนุภาค ในปัจจุบันอลิซกำลังวางแผนที่จะทำการปรับปรุงระบบติดตามทางเดินอนุภาคใหม่ เพื่อใช้ในการตรวจจับอนุภาคหายากซึ่งมีค่าโมเมนตัมตามขวางต่ำ ITS ใหม่นี้จะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ชนิดซิลิคอนพิกเซลจำนวนเจ็ดชั้นติดตั้งไว้บนโครงสร้างที่รองรับ เป้าหมายหนึ่งของการออกแบบใหม่ในครั้งนี้คือ การลดค่างบประมาณวัสดุ (X/X_0) ต่อชั้นให้เหลือเพียง 0.3% สำหรับชั้นตรวจวัดชั้นในสุดและ 0.8% สำหรับชั้นตรวจวัดชั้นกลางและชั้นนอก ในงานนี้ จะทำการจำลองแบบตามข้อมูลทางเรขาคณิตโดยละเอียดของโครงสร้างรองรับต่าง ๆ ของระบบติดตามทางเดินอนุภาคทั้งชั้นในและชั้นนอก โดยใช้ซอฟท์แวร์ ALIROOT ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยซอฟท์แวร์ดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะลดค่างบประมาณวัสดุของระบบติดตามทางเดินอนุภาคทั้งชั้นในและชั้นนอกลงได้ตามที่คาดการณ์ไว้เพื่อการนำไปผลิตต้นแบบต่อไป

คำสำคัญ การออกแบบเครื่องตรวจจับและเทคโนโลยีการจำลองและวัสดุ การออกแบบและการจำลองแบบเครื่องตรวจจับอนุภาค เครื่องติดตามทางเดินอนุภาค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

The aim of the ALICE Collaboration is to study the physics of strongly interacting matter by using the experimental results from a dedicated heavy-ion detector. The Inner Tracking System (ITS) is located at the heart of the ALICE detector surrounding the interaction point. Currently, ALICE is planning to upgrade the ITS for rare probes at low transverse momenta. The new ITS comprises seven layers of silicon pixel sensors on the supporting structure. One goal of the new design is to reduce the material budget (X/X_0) per layer to 0.3% for the inner layers and 0.8% for the middle and outer layers. In this work, we perform simulations based on detailed geometrical descriptions of different supporting structures for the inner and outer barrels by using ALIROOT. Our results indicate that it is possible to reduce the material budget of the inner and outer barrels to the expected value. Manufacturing of such prototypes is also possible.

Keywords: Detector design and construction technologies and materials; Detector modelling and simulations; Particle tracking detectors

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ก

บทคัดย่อ ข

Abstract ค

สารบัญ ง

สารบัญรูป ฉ

1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการ 3

2 การทบทวนความรู้ ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 การทบทวนองค์ความรู้/ทฤษฎี/ผลงานที่มีมาก่อน 4

2.2 ระเบียบวิธีวิจัย 4

3 ระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นใน 6

3.1 ระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในในปัจจุบัน 6

3.2 การปรับปรุงระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นใน 7

3.3 ขอบเขตระบบงานอลิซแบบออฟไลน์-AliRoot 7

3.4 ขอบเขตระบบงานอลิซแบบออฟไลน์และออนไลน์-O^2 9

4 โครงสร้างของสเตฟในระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในที่ปรับปรุงใหม่ในหัววัดอลิซ 11

4.1 โครงสร้างสนับสนุน-สเตฟ 11

4.2 แบบจำลองสเตฟโมเดล 0 11

4.3 แบบจำลองสเตฟโมเดล 1 12

4.4 แบบจำลองสเตฟโมเดล 2 12

4.5 แบบจำลองสเตฟโมเดล 3 13

4.6 แบบจำลองสเตฟโมเดล 4 13

5 การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างบริการและโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง 15

5.1 โครงสร้างบริการ 15

5.2 โมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง 15

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1 รายละเอียดของวัสดุที่ใช้	17
5.2.2 แบบจำลองที่เสร็จสมบูรณ์	18
6 การคำนวณค่างบประมาณวัสดุ	**20**
6.1 หลักการและวัตถุประสงค์	20
6.2 ความยาวรังสี	21
6.3 ภาคตัดขวาง (cross section) และระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path)	22
6.4 การสูญเสียพลังงานของอนุภาคมีประจุอันเนื่องมาจากอันตรกิริยากับอิเล็กตรอน	24
6.5 การสูญเสียพลังงานจากการไอออนไนเซชั่น	25
6.6 การสูญเสียพลังงานจากเบรมสตราลังและการเกิดคู่	26
6.7 การสูญเสียพลังงานจากฝอยแม่เหล็กไฟฟ้า	28
6.8 การเบี่ยงเบนทิศทางจากการกระเจิงหลายจุด	28
6.9 การหาค่างบประมาณวัสดุ (X/X_0)	29
7 การวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุของสเตฟสำหรับติดตั้งในระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นใน	**30**
7.1 การสร้างแบบจำลองสเตฟเพื่อคำนวณค่างบประมาณวัสดุ	30
7.2 ผลการวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุของสเตฟสำหรับชั้นตรวจวัดชั้นใน	30
7.3 ผลการวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุของสเตฟสำหรับชั้นตรวจวัดชั้นนอก	34
8 การวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง	**38**
8.1 การเตรียมข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลอง	38
8.2 การคำนวณชุดคำสั่งที่ถูกปรับปรุงใหม่สำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง	39
8.3 ผลการวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุ สำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง	39
9 สรุปผลและวิจารณ์	**41**
บรรณานุกรม	**43**

สารบัญรูป

1.1 แผนภาพจำลองเครื่องตรวจหาอนุภาคอลิซ [2] 1
1.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ EUTelescope 3

3.1 แบบแสดงระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในในปัจจุบัน 6
3.2 แบบแสดงระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในที่ปรับปรุงใหม่ 8
3.3 แผนผังขอบเขตระบบงานซอฟต์แวร์ AliRoot 8
3.4 แผนผังการนำเข้าข้อมูลแบบออฟไลน์และออนไลน์สำหรับการจำลองแบบ 9
3.5 แผนผังการไหลของข้อมูลสำหรับการสร้างใหม่และปรับเทียบแบบออนไลน์ของ O^2 10

4.1 แบบจำลองสเตฟโมเดล 0 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้เทคโนโลยีระบายความร้อนแบบท่อคู่ที่ขอบทั้งสองด้าน 12
4.2 แบบจำลองสเตฟโมเดล 1 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้เทคโนโลยีระบายความร้อนแบบไมโครแชนแนลที่ทำจากโพลีไอไมด์ 13
4.3 แบบจำลองสเตฟโมเดล 2 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้ท่อระบายความร้อนที่ทำจากโพลีไอไมด์ขนาดรัศมี 0.15 มม. ตรงกลาง 13
4.4 แบบจำลองสเตฟโมเดล 2 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้ท่อระบายความร้อนที่ทำจากโพลีไอไมด์ขนาดรัศมี 0.10 มม. ตรงกลาง 14
4.5 แบบจำลองสเตฟโมเดล 3 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้ระบบระบายความแบบไมโครแชนแนลที่ทำจากซิลิกอน 14
4.6 แบบจำลองสเตฟโมเดล 4 ที่ทีการพัฒนามาจากโมเดล 2 14

5.1 แบบแสดงชั้นตรวจวัดที่ประกอบกับโครงสร้างบริการ 15
5.2 แบบแสดงครึ่งวงรอบของโครงสร้างบริการวงในที่โมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง ของระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในที่ปรับปรุงใหม่ 16
5.3 แบบแสดงรายละเอียดของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง 16
5.4 แบบแสดงตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วยวัสดุเนื้อผสมสามคลาส โดยวัสดุรูปกล่องสีเทาคือ PCB สีชมพูขนาดใหญ่คือ SHIELD และสีชมพูขนาดเล็กคือ PASSIVE 17
5.5 แบบแสดงแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (สีเทา) ท่อหล่อเย็น (สีแดง กับ สีน้ำเงิน) สำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งหน่วย 18
5.6 แบบแสดงขั้วเชื่อมต่อภายนอก สำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง 18
5.7 แบบแสดงการวางโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงตามแนวยาว (ซ้าย) และแนวภาคตัดขวาง (ขวา) 19
5.8 แบบจำลองทางเรขาคณิตที่ถูกสร้างขึ้นด้วยในโปรแกรม AliRoot 19

6.1 ภาพประกอบนิยามของ cross section 22

สำนักวิทยบริการเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

6.2 ตัวอย่างของค่ากำลังงานหยุดมวลในกระบวนการไอออไนเซชั่นที่แตกต่างกันในสสารแต่ละชนิด สำหรับอนุภาคมิวออน ไพออน และโปรตอน ใน bubble chamber 26

6.3 กราฟแสดงค่ากำลังงานหยุดมวลจากสมการของ Bethe สำหรับมิวออนประจุบวกในทองแดง เทียบกับปริมาณ $\beta\gamma$ โดยที่เส้นทึบคือค่าปริมาณรวม แถบแนวตั้งจะถูกใช้แบ่งช่วงของการพิจารณา เส้นจุดสีเขียว คือ ค่าของมิวออนประจุลบที่คำนวณโดยคำนึงถึงผลกระทบ [29] 27

6.4 กราฟแสดงการจำลองผลของการทดลอง EGS4 ของฝอยที่เกิดจากการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนใน เหล็ก แสดง ให้ เห็น ความ แตก ต่าง ของ พลังงาน ที่ สูญ เสีย ของ โฟ ตอน (สี่เหลี่ยม) และอิเล็กตรอน (จุด) 28

6.5 แผนผังแสดงการเบี่ยงเบนทิศทางของอนุภาคจากการกระเจิงหลายจุด 29

7.1 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 0 31

7.2 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 1 32

7.3 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 21 33

7.4 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 22 33

7.5 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 3 34

7.6 แผนภาพแสดงของโครงสร้างรองรับและระบบระบายความร้อนของสเตฟสำหรับติดตั้งในชั้นตรวจวัดชั้นนอก [10] 34

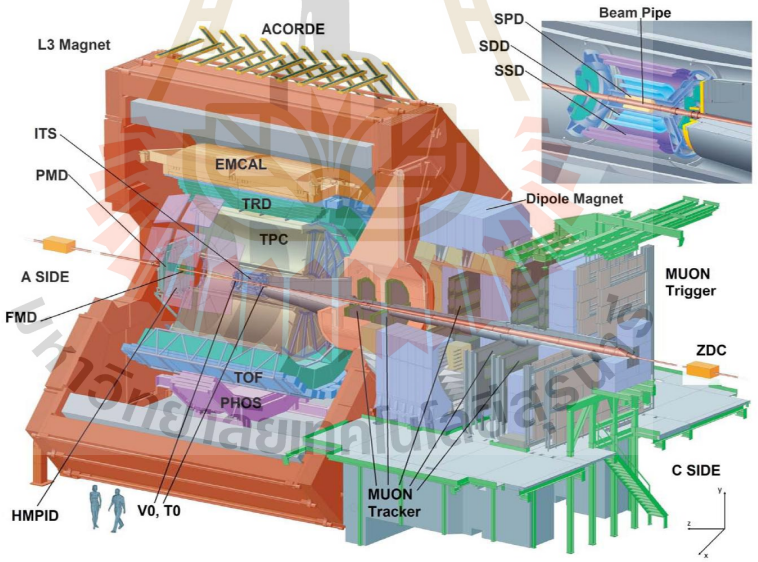
7.7 แผนภาพการกระจายตัวค่างบประมาณวัสดุของต้นแบบสเตฟสำหรับติดตั้งในชั้นตรวจวัดชั้นนอก ยอดที่สูงที่สุดในแผนภาพแสดงค่างบประมาณวัสดุของท่อระบายความร้อนโพลีไอไมด์ที่บรรจุน้ำ [10] 37

8.1 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุในแนวตัดขวางระหว่างมุม 0 ถึง 90 องศา ของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงในชั้นตรวจวัดชั้นนอก 39

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ห้องปฏิบัติการอลิซ (ALICE-A Large Ion Collider Experiment) ได้รับการออกแบบมาเพื่อศึกษาคุณสมบัติของ Quark-Gluon Plasma (QGP) ซึ่งเป็นสถานะแบ่งแยกของสสารที่มีปฏิสัมพันธ์อย่างรุนแรง ประกอบด้วยระบบย่อยจำนวน 18 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ในงานนี้เราให้ความสำคัญกับระบบที่อยู่ ณ ใจกลางของเครื่องตรวจหาอนุภาคอลิซที่เรียกว่าระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นใน (Inner Tracking System หรือ ITS) ซึ่งประกอบด้วยชั้นตรวจวัดทั้งหมด 6 ชั้น ซึ่งใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด หน้าที่หลักของ ITS คือการตรวจหาอนุภาคที่จุดการชนปฐมภูมิ และจุดการชนทุติยภูมิ (อนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่เสถียรบางตัวจะสลายตัวหลังจากเดินทางมาเป็นระยะหนึ่งถึงสองร้อยไมโครเมตร) ดังนั้น อุปกรณ์ตรวจวัดชั้นในสุดจึงจำเป็นต้องมีความละเอียดสูงในการบันทึกพิกัด x และ y ของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่าน [1]



รูปที่ 1.1 แผนภาพจำลองเครื่องตรวจหาอนุภาคอลิซ [2]
(ที่มา: Conceptual Design Report for the Upgrade of the ALICE ITS)

ความแม่นยำของ ITS ในปัจจุบันสำหรับการตรวจวัดอนุภาค Charm mesons ที่มีโมเมนตัมตามขวางต่ำ (< 1 GeV/c) นั้นยังไม่เพียงพอ รวมถึงอนุภาค Charm baryons ซึ่ง Charm baryon ที่มีมวลต่ำสุดคือ Λ_c มีค่าประมาณ 2286.46$\pm$0.14 MeV/c^2 [3] กระบวนการสำคัญในการตรวจวัดอนุภาคชนิดนี้คือ กระบวนการสลายตัวของ $\Lambda_c \rightarrow pK^-\pi^+$ โดยมีอัตราส่วนการแตกสาขาเท่ากับ 5.0 $\pm$ 1.3% มีความยาวเฉลี่ยที่เหมาะสมของการสลายตัว ($c\tau$) เพียง 60 μm และอายุไขที่สั้นมากเมื่อเทียบกับค่าความ

ละเอียดในการตรวจวัดของ ITS ในปัจจุบัน ดังนั้นจึงสามารถตรวจพบอนุภาคชนิดนี้ได้น้อยมากจากการทดลองการชนกันของตะกั่ว-ตะกั่ว

การทดลองการชนของตะกั่ว-ตะกั่ว ในปัจจุบันนั้น สามารถทำได้โดยการวัดอัตราส่วนสัญญาณต่อพื้นหลังซึ่งมีค่าต่ำมาก ดังนั้น เพื่อให้บรรลุเป้าหมายของการตรวจหาควาร์คหนักซึ่งเป็นองค์ประกอบของอนุภาค Charm mesons และ Charm baryons จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงระบบติดตามทางเดินภายในของหัววัดอลิซ [2]

ITS ในปัจจุบันครอบคลุมช่วงของ pseudorapidity $|\eta|$ <0.9 อยู่ห่างจากจุดที่เกิดอันตรกิริยา $\pm$ 60 มม. โดยเทคโนโลยีเซนเซอร์ที่ใช้ในแต่ละชั้นตรวจวัดจะแตกต่างกัน (รายละเอียดเพิ่มเติมอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1)

การปรับปรุงใหม่นี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการติดตามทางเดินอนุภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับชั้นตรวจวัดชั้นในสุด ได้มีการเพิ่มชั้นตรวจวัดอีกหนึ่งชั้นเพื่อเพิ่มความละเอียดของพื้นที่ส่วนในสุด นอกจากนี้เซนเซอร์ชนิดซิลิคอนจะถูกแทนที่ด้วยเซนเซอร์แบบพิกเซล (Monolithic Active Pixel Sensors หรือ MAPS) ทั้งหมด ซึ่งจะช่วยลดความหนาของชั้นการตรวจวัดลงได้ การปรับปรุงนี้จะช่วยให้ค่างบประมาณวัสดุโดยรวมลดลง การลดลงของค่างบประมาณวัสดุสำหรับชั้นตรวจวัดชั้นในของ ITS นั้น สามารถเพิ่มความละเอียดของพารามิเตอร์ผลกระทบและประสิทธิภาพการติดตามทางเดินของอนุภาคที่มีโมเมนตัมตามขวางต่ำได้

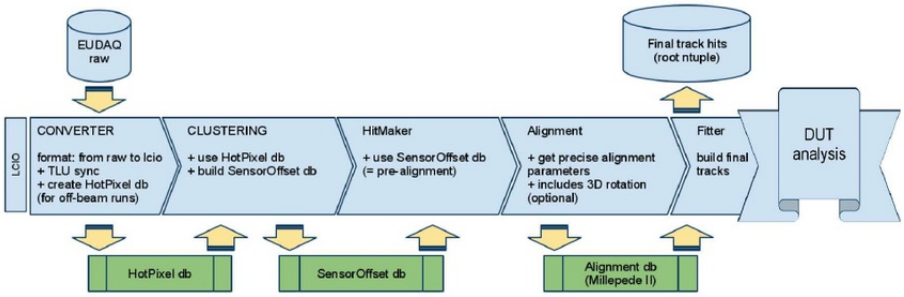
สำหรับเทคโนโลยีเซนเซอร์ที่ได้มีการนำเซนเซอร์แบบพิกเซลมาใช้งาน [4] ได้รับการพัฒนามาตั้งแต่ปลายปี 1990 โดยมีซิลิกอนเป็นซับเตทและชั้นเอพิแทกเซียลที่บาง เซนเซอร์แต่ละตัวมีขนาด 15 มม. $\times$ 30 มม. พร้อมชั้นเอพิแทกเซียลที่ค่าความต้านทานสูง

ในการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ดังกล่าว จะใช้ซอฟต์แวร์ที่ชื่อ EUDAQ [5] ซึ่งเป็นระบบรวบรวมข้อมูลแบบหลายแพลตฟอร์มที่เขียนด้วยโปรแกรมภาษา C++ และออกแบบมาให้ทำงานแบบแยกส่วนและสามารถทำงานได้บนระบบปฏิบัติการ Linux Mac OSX และ Windows ซึ่งจะช่วยให้ทำการทดสอบอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ (DUT) นั่นก็คือชิป pALPIDE ได้อย่างสะดวก ในขั้นตอนต่อไปจะใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ที่เรียกว่า EUTelescope [6, 7] ซึ่งเป็นกลุ่มของซอฟท์แวร์ประมวลผลที่ช่วยให้สามารถสร้างทางเดินอนุภาคและไฟล์ข้อมูลใหม่ได้

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย EUTelescope นั้น ได้รับการยอมรับในแง่ของการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อลำแสงทดสอบ ผลของการทดสอบด้วยลำแสงจะแสดงข้อมูลของการชน (Hit) ของอนุภาคในแต่ละชั้น การกระจายตัวของขนาดของคลัสเตอร์ และประสิทธิภาพในการติดตามอนุภาคของเซนเซอร์ ลำดับการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของ EUTelescope แสดงดังรูป 1.2

หลังจากได้ข้อมูลการสร้างใหม่ของทางเดินอนุภาคจาก EUTelescope แล้ว เราจะทำการศึกษาประสิทธิภาพการในการติดตามทางเดินอนุภาค [8] โดยใช้เครื่องมือการประมาณค่าอย่างรวดเร็ว (Fast Estimation Tool หรือ FET) ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงร่างของเครื่องตรวจจับและระบบติดตาม แบบจำลองดังกล่าวได้รับการพัฒนาจนกลายมาเป็น Fast Monte-Carlo Tool หรือ FMCT เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือตรวจจับในแต่ละชั้น ตำแหน่งในแนวรัศมี และค่างบประมาณวัสดุ [9]

ผลการวิเคราะห์จาก FET และ FMCT จะแสดงประสิทธิภาพการติดตามทางเดินอนุภาคของ ITS ใหม่ในแง่ของความละเอียดต่อชั้น $(\sigma_{r\phi,p}, \sigma_z, p)$ ความละเอียดของ p_T และประสิทธิภาพการติดตาม



รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ EUTelescope
(ที่มา: Conceptual Design Report for the Upgrade of the ALICE ITS)

$\rho(r,z)$ จากการศึกษาข้างต้นโดยไม่อาศัยข้อมูลจากเซนเซอร์จริง [10] พบว่า ความละเอียดของการชี้ตำแหน่งมีค่าเพิ่มขึ้น 3 เท่าอย่างมีนัยสำคัญ ความละเอียดของโมเมนตัมตามขวางเพิ่มขึ้น 2.5 เท่า ที่พลังงาน 0.5 GeV/c และประสิทธิภาพในการติดตามทางเดินอนุภาคที่โมเมนตัมตามขวางต่ำดีขึ้นอย่างมาก ($p_T \sim 0.2$ GeV/c) [11]

ใน การ ศึกษา ฟิ สิ กส์ ของ อนุภาค หนัก สามารถ ใช้ เครื่อง มือ ใน การ สร้าง เหตุการณ์ เพื่อ จำลอง กระบวนการฟิสิกส์ที่ประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมากมหาศาล เช่น PHYTIA [12] และ HIJING [13] เครื่องมือจำลองเหตุการณ์จะทำงานร่วมกับซอฟท์แวร์ FET หรือ FMCT และสามารถทำให้ทราบข้อมูลที่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของ ITS ในปัจจุบันได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการยืนยันความเป็นไปได้ที่จะค้นหาอนุภาคที่ยังตรวจไม่พบต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องตรวจวัดอนุภาค

1.2.2 ออกแบบและจำลองการทำงานของชั้นตรวจวัดในระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นใน

1.2.3 ออกแบบและจำลองการทำงานของโมดุลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การวิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบเพื่อคำนวณหาค่างบประมาณวัสดุ ของชั้นตรวจวัดชั้นต่าง ๆ และโมดุลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการ

1.4.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ชุดการคำนวณค่างบประมาณวัสดุ

1.4.2 ระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในใหม่ของหัววัดอลิซ

บทที่ 2
การทบทวนความรู้ ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนองค์ความรู้/ทฤษฎี/ผลงานที่มีมาก่อน

การศึกษาแรงนิวเคลียร์อย่างแรง (strong interaction) สามารถทำได้จากการศึกษาอันตรกิริยาภายในนิวเคลียสของธาตุ ซึ่งโดยทั่วไปนิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ จะประกอบด้วยอนุภาคหลัก 2 ชนิด คือ นิวตรอน กับโปรตอน ทั้งนิวตรอนและโปรตอนจัดเป็นฮาดรอนที่มี ควาร์ก u และ d เป็นองค์ประกอบ เท่าที่ผ่านมา ควาร์ก u และ d มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีมวลไม่สูงมากนัก พบได้ในนิวเคลียสของธาตุทั่วไป และ สามารถศึกษาได้ในเครื่องเร่งอนุภาคที่มีพลังงานไม่สูงนัก ซึ่งตรงข้ามกับการศึกษาควาร์ก s กับ c ที่ทำได้ยากกว่า เนื่องจากพบในธรรมชาติไม่มากนัก อนุภาคที่เราสนใจเพื่อใช้ในการศึกษาแรงนิวเคลียร์อย่างแรง ในที่นี้คืออนุภาคไฮเปอร์ตริตอน และ แลมบ์ดาซี ซึ่งมีควาร์ก s และ c เป็นองค์ประกอบ และคาดว่าจะวัดได้มากขึ้นที่ห้องปฏิบัติการอลิซ เซิร์น ภายหลังจากที่มีการปรับปรุงระบบติดตามทางเดินอนุภาค แล้วเสร็จในปี 2561 การวัดการเกิด อนุภาคไฮเปอร์ตริตอน และ แลมบ์ดาซี หลังการชนของไอออนหนักจะช่วยให้เราเข้าใจสมบัติของควาร์ก s และ c มากขึ้น แต่ที่ผ่านมาการวัดการเกิดอนุภาคไฮเปอร์ตริตอน และ แลมบ์ดาซี ทำได้ยาก เนื่องจากอนุภาคทั้งสอง 2 ชนิดนี้ มีมวลมาก มีอายุสั้น มีโมเมนตัมตามขวางต่ำ มีระยะทางในการสลายตัวสั้น และสูญเสียพลังงานได้ง่ายเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งหากต้องการวัดอนุภาคอนุภาคไฮเปอร์ตริตอน และ แลมบ์ดาซี ต้องออกแบบหัววัดให้มีค่า Material Budget ต่ำ และตำแหน่งการติดตั้งของหัววัดควรอยู่ใกล้จุดที่เกิดการชนของไอออนหนักมากที่สุด

2.2 ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานการวิจัยการศึกษาโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ในระบบติดตามภายในของหัววัดอลิซที่ปรับปรุงใหม่ จะทำการออกแบบและจำลองการทำงานของหัววัดด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณค่างบประมาณวัสดุของระบบติดตามภายในของหัววัดอลิซที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1) โครงสร้างสนับสนุนและรับน้ำหนัก ทำจากโพลีไอไมด์ (polyimide) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นทนต่อความร้อนและสารเคมี ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์สำหรับทำเป็นสายเคเบิลที่มีความยืดหยุ่น มีสมบัติเป็นฉนวน

2) เซนเซอร์ ทำจากสารกึ่งตัวนำเพื่อตรวจจับแนวทางเดินของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่าน

3) ระบบระบายความร้อน เนื่องจากเซนเซอร์จะมีอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตลอดเวลาที่ทำการวัด การตรวจจับรูปแบบสัญญาณกระทำโดยใช้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ต้องมีการออกแบบระบบระบายความร้อนที่มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้การใช้สารระบายความร้อนแบบต่าง ๆ ก็มีผลต่อระยะในการแผ่รังสีรวมอีกด้วย

4) สายเคเบิลแบนยืดหยุ่น (flex cable) เป็นสายเคเบิลทางไฟฟ้าที่มีลักษณะแบนและมีความยืดหยุ่น ประกอบด้วยฟิล์มแบนที่มีความยืดหยุ่นและมีชั้นโลหะทำหน้าที่เป็นตัวนำ อาจมีการเสริมความแข็งแรงที่ด้านปลายเพื่อการติดตั้งเข้ากับหัวต่อรับสัญญาณ

5) โมดุลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

การคำนวณค่างบประมาณวัสดุ สามารถกระทำได้โดย การสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของหัววัด พร้อมทั้งรายละเอียดต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ เช่น สูตรทางเคมี ความหนาแน่น เลขอะตอม และเลขมวล เป็นต้น แล้วใช้ชุดโปรแกรมของหัววัดอลิซ ได้แก่ root, geant3 และ AliRoot ซึ่งเป็นชุดโปรแกรมที่เขียนโดย c++ และ FORTRAN เขียนชุดคำสั่งด้วย c++ class สำหรับทำการคำนวณเปรียบเทียบค่าระยะในการแผ่รังสี และ Material Budget ของโครงสร้างที่แบบต่าง ๆ เพื่อหาว่าแบบจำลองใดที่ให้ค่า Material Budget ต่ำสุดสอดคล้องตามที่ตั้งเป้าหมายไว้คือ 0.3%

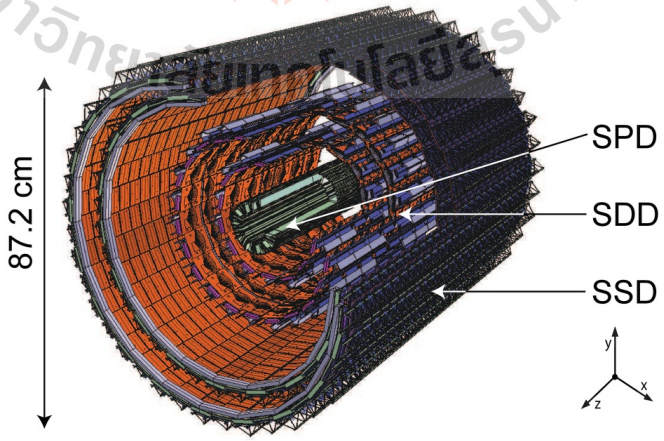
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
ระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นใน

ITS ในปัจจุบันจะใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสามประเภท ได้แก่ เซนเซอร์ชนิดพิกเซลซิลิคอนถูกใช้ในชั้นสองชั้นในสุด เซนเซอร์ชนิดดริฟท์ซิลิคอนติดตั้งในสองชั้นถัดมา และเซนเซอร์ชนิดแถบซิลิกอนติดตั้งที่สองชั้นนอกสุด [2] เนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของหัววัดรุ่นปัจจุบัน การปรับปรุงที่จะเกิดขึ้นในรุ่นถัดไป โดยทั้งหมดจะถูกสร้างเป็นแบบจำลองทางเรขาคณิตโดยใช้โปรแกรม AliRoot

3.1 ระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในในปัจจุบัน

ระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในในรุ่นปัจจุบันนั้นประกอบด้วยชั้นตรวจวัดจำนวนหกชั้น แต่ละชั้นจะประกอบด้วยโครงสร้างรูปแท่งสามเหลี่ยมที่ใช้ยึดแผ่นเซนเซอร์ที่เรียกว่าสเตฟ (Stave) ติดตั้งตามแนวยาวล้อมรอบท่อส่งลำอนุภาคโดยมีจุดกึ่งกลางอยู่ที่ตำแหน่งที่ลำอนุภาควิ่งมาชนกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ITS มีขอบเขตการตรวจวัดครอบคลุมองศาของการกระเจิงประมาณ $\pm 45^{\circ}$ จากจุดที่เกิดการชนกันในแนวตั้งฉากกับลำอนุภาค เนื่องจากอนุภาคที่เกิดขึ้นภายหลังการชนกันปริมาณหนาแน่นมากในช่วงใกล้จุดการชนและจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่ออยู่ห่างออกไป ชั้นตรวจวัดแต่ละชั้นจึงถูกออกแบบมาโดยใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ที่แตกต่างกัน โดยสองชั้นในสุดจะใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์แบบ Silicon Pixel Detector (SPD) ทำหน้าที่รองรับอนุภาคที่มีความยาวของการสลายตัวที่สั้น สำหรับสองชั้นถัดมาจะใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์แบบ Silicon Drift Detector (SDD) ทำหน้าที่สำหรับการวัดการสูญเสียพลังงาน ส่วนชั้นที่เหลือนั้น ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้ระบุชนิดของอนุภาคซึ่งใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์แบบ Silicon Strip Detector (SSD) [2]



รูปที่ 3.1 แบบแสดงระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในในปัจจุบัน
(ที่มา: The ALICE Experiment at the CERN LHC [14])

ระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในนั้นถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการระบุจุดพิกัด (Vertex) ของอนุภาค

ปฐมภูมิ (Primary Particle) มีความละเอียดมากกว่า 100 ไมโครเมตร สามารถตรวจจับอนุภาคที่มีโมเมนตัมตามขวางต่ำกว่า 200 Mev/c และยังสามารถคำนวณหาจุดพิกัดของอนุภาคทุติยภูมิ (Secondary Particle) ที่เกิดจากการสลายตัวของอนุภาคไฮเปอรอน ดีเมซอน และบีเมซอนได้

3.2 การปรับปรุงระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นใน

เป้าหมายหลักของการปรับปรุง ITS คือเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการวัดพิกัดที่เกิดอันตรกิริยาชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิของฮาดรอนหนักและเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีขึ้นสำหรับการตรวจวัดอนุภาคที่มี p_T ต่ำ วัตถุประสงค์ของการออกแบบคือการปรับปรุงแก้ไขพารามิเตอร์ผลกระทบให้ดีขึ้นสำหรับโมเมนตัมตามขวางขนาด 500 MeV/c รวมถึงประสิทธิภาพในการติดตามทางเดินของอนุภาคด้วย เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์เหล่านี้ จึงได้มีการปรับลดระยะห่างของชั้นตรวจวัดชั้นในสุด เพื่อให้เข้าใกล้จุดที่เกิดการชนมากขึ้น จากเดิม 39 มม. เหลือเพียง 22 มม. โดยที่ค่างบประมาณวัสดุใหม่จะต้องลดลงเหลือ 0.3% X/X_0 ต่อชั้นสำหรับชั้นในสุดและ 0.8% X/X_0 สำหรับชั้นนอก นอกจากนี้ ยังได้มีการเพิ่มค่าความละเอียดในการตรวจวัดขึ้นโดยการเพิ่มชั้นตรวจวัดจากเดิม 6 ชั้น เป็น 7 ชั้น และใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ชนิดซิลิกอนพิกเซลที่มีขนาดเล็กลงทั้งหมด จากเดิมขนาด 50 μm $\times$ 425 μm เป็น 30 μm $\times$ 30 μm โดย ITS ที่ปรับปรุงใหม่นี้จะมีความสะดวกในการถอดประกอบในช่วงของการบำรุงรักษามากขึ้นด้วย

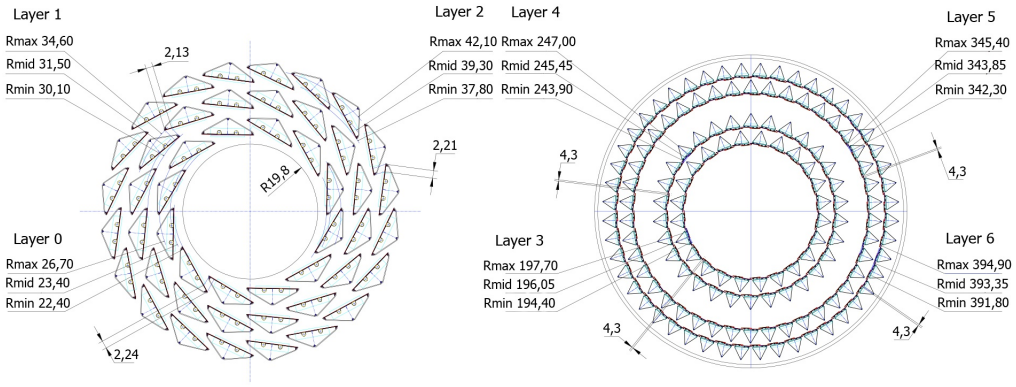
ITS ที่ปรับปรุงใหม่นี้ จะลดขนาดของรัศมีท่อลำเลียงแสงลงจาก 2.94 ซม. เป็น 1.98 ซม. ทำให้สามารถวางชั้นตรวจวัดชั้นในสุดได้ใกล้กับจุดการชนเพิ่มขึ้น 9.6 mm การออกแบบใหม่นี้คาดว่าจะช่วยแก้ไขพารามิเตอร์ผลกระทบให้ดีขึ้น 3 เท่า และการนำเซนเซอร์แบบซิลิกอนพิกเซลมาใช้ในชั้นตรวจวัดทั้งเจ็ดของ ITS ใหม่ จะช่วยลดค่างบประมาณวัสดุลงถึง 7 เท่าอีกด้วย [15] สำหรับการส่งออกข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับ ได้มีการออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมด้านการส่งผ่านข้อมูล โดยเพิ่มความถี่ของการอ่านสูงสุดถึง 50 MHz สำหรับการชนของอนุภาค Pb-Pb และประมาณ 200 kHz สำหรับการชนของ pp [16] นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงระบบระบายความร้อนใหม่เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถถ่ายเทความร้อนดีขึ้น

การออกแบบของ ITS ใหม่นี้ประกอบไปด้วยส่วนตรวจวัดชั้นใน (ชั้น 0 ถึง 2) ชั้นกลาง (ชั้น 3 ถึง 4) และชั้นนอก (ชั้น 5 ถึง 6) ดังรูปที่ 3.2

ค่างบประมาณวัสดุที่คาดการณ์ไว้สำหรับการปรับปรุงใหม่ในครั้งนี้ ได้ถูกคำนวณโดยใช้ค่างบประมาณวัสดุโดยรวมของส่วนประกอบแต่ละชั้น โดยไม่คำนึงถึงรายละเอียดทางเรขาคณิต ค่าเป้าหมายในการออกแบบโครงสร้างสนับสนุนใหม่นี้แสดงในตารางที่ 3.1

3.3 ขอบเขตระบบงานอลิซแบบออฟไลน์-AliRoot

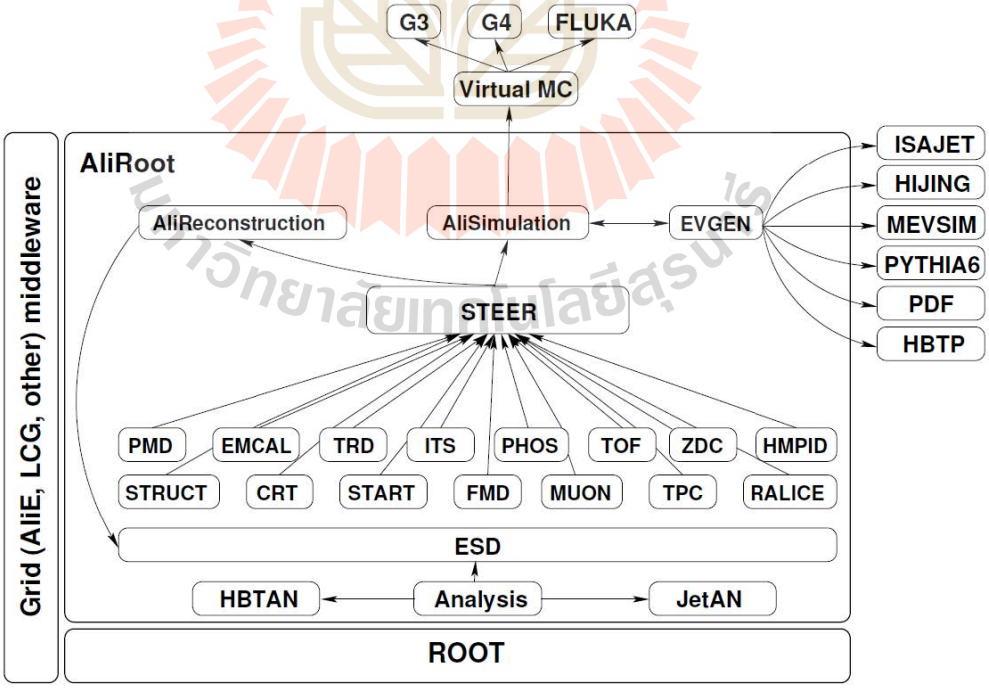
ขอบเขตระบบงานอลิซแบบออฟไลน์ หรือ AliRoot ได้รับการพัฒนามาพร้อมกับการสร้างหัววัดอลิซโดยมีจุดประสงค์เพื่อจำลองการชนกันของอนุภาค และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นตามมาหลังจากการชนกันของ p-p และอันตรกิริยาของไอออนหนัก การสร้างใหม่และการวิเคราะห์ผลสำหรับทั้งการจำลองและการทดลองที่เกิดขึ้นจริงซึ่งได้มีการใช้งาน AliRoot มาจนถึงปัจจุบัน (LHC รัน 2)



รูปที่ 3.2 แบบแสดงระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในที่ปรับปรุงใหม่

(ที่มา: Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System [10])

AliRoot ถูกพัฒนาขึ้นจากซอฟท์แวร์ ROOT [17] ซึ่งจะรวบรวมข้อมูลทั้งหมดของอุปกรณ์ตรวจวัดย่อย เช่น คำอธิบายรูปทรงเรขาคณิต พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัด ข้อมูลการจัดตำแหน่งและข้อมูลการสอบเทียบ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 การจำลองเหตุการณ์สามารถทำได้โดยใช้เครื่องกำเนิดเหตุการณ์ภายนอกหรือเครื่องกำเนิดเหตุการณ์เสมือน Monte-Calo ร่วมกับข้ออุปกรณ์ตรวจวัดย่อยต่าง ๆ โดยข้อมูลนำเข้า สามารถใช้ข้อมูลที่ได้ทั้งจากการจำลอง (ออฟไลน์) หรือข้อมูลจริงของการทดลอง (ออนไลน์) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



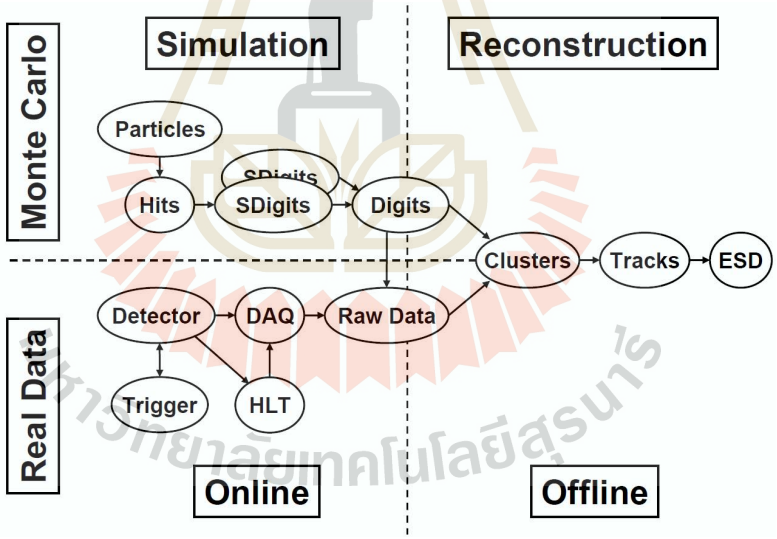
รูปที่ 3.3 แผนผังขอบเขตระบบงานซอฟต์แวร์ AliRoot

(ที่มา: ALICE computing:Technical Design Report [17])

ตารางที่ 3.1 ผลการประมาณการค่างบประมาณวัสดุที่ใช้ในระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในที่ปรับปรุงใหม่ของ ALICE (ตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงค่างบประมาณวัสดุในปัจจุบัน)

ชั้น	รัศมี (ซม.)	ค่างบประมาณวัสดุ (%X_0)
ชั้นในสุด		
1 pixel (pixel)	2.2 (3.9)	0.3 (1.14)
2 pixel (pixel)	2.8 (7.6)	0.3 (1.14)
3 pixel (none)	3.6 (-)	0.3 (-)
ชั้นกลาง		
4 pixel (driff)	20.0 (15.0)	0.8 (1.13)
5 pixel (driff)	22.0 (23.9)	0.8 (1.26)
ชั้นนอก		
6 pixel (strip)	41.0 (38.0)	0.8 (0.83)
7 pixel (strip)	43.0 (43.0)	0.8 (0.83)

(ที่มา: Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System [10])



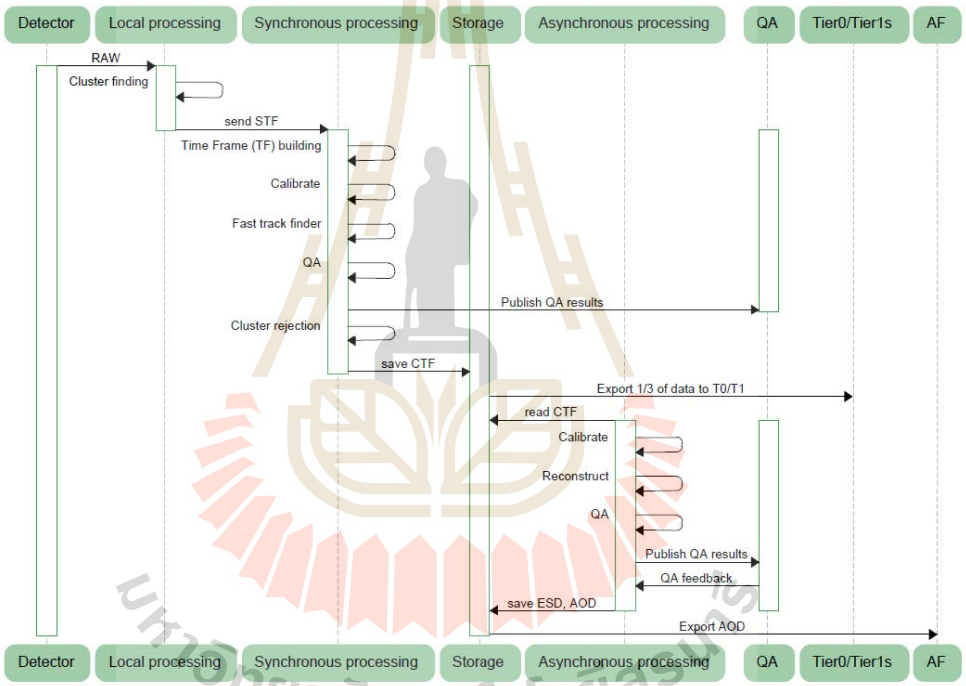
รูปที่ 3.4 แผนผังการนำเข้าข้อมูลแบบออฟไลน์และออนไลน์สำหรับการจำลองแบบ
(ที่มา: ALICE computing:Technical Design Report [17])

3.4 ขอบเขตระบบงานอลิซแบบออฟไลน์และออนไลน์-O^2

อลิซได้เตรียมการเกี่ยวกับการพัฒนาขอบเขตระบบงานสำหรับช่วงของการทดลอง LHC รัน 3 และ 4 โดยการรวมระบบข้อมูลนำเข้าแบบออฟไลน์และออนไลน์เข้าด้วยกัน เพื่อลดทรัพยากรสำหรับเก็บข้อมูลในกระบวนการสร้างกลับและการสอบเทียบลง เรียกว่า The ALICE Online-Offline Computing System หรือ O^2

การปรับปรุงประสิทธิภาพในการวัดฮาดรอนหนัก quarkonia โมเมนตัมต่ำ และ low-mass di-lepton ให้มีความแม่นยำมากขึ้นจะต้องใช้ข้อมูลจากการชนเพิ่มมากขึ้นซึ่งคาดว่าจะสูงถึง 1 TB/s สำหรับการชนของตะกั่ว-ตะกั่ว จึงจำเป็นจะต้องทำการปรับปรุงระบบถ่ายโอนข้อมูลให้รวดเร็วยิ่งขึ้น

O^2 ถูกออกแบบมาเพื่อลดปริมาณข้อมูลในระหว่างถ่ายโอนข้อมูล โดยการรวมระบบนำเข้าข้อมูลแบบ ออนไล์และออฟไลน์เข้าด้วยกัน [18] ในระหว่างการรับข้อมูลนั้น ข้อมูลจะถูกสร้างขึ้นใหม่ และบีบอัดเป็นส่วน ๆ ทั้งสัญญาณที่ส่งมาแบบซิงโครนัสและแบบอะซิงโครนัส ซึ่งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า การสร้างกลับแบบออนไลน์โดยจะทำการสอบเทียบไปพร้อมกัน รูปที่ 3.5 แสดงการไหลของข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่องตรวจวัดผ่านกระบวนการซิงโครนัส จากนั้นจะถูกบีบอัดและบันทึกไว้ ส่วนข้อมูลที่ส่งมาแบบอะซิงโครนัสจะถูกบันทึกในรูปแบบ ESD พร้อมทั้งแสดงการรับรองข้อมูล ปัจจุบัน O^2 กำลังอยู่ในช่วงของการพัฒนาและจะพร้อมใช้งานสำหรับการทดลอง LHC รัน 3 และ 4 ในปี ค.ศ. 2020



รูปที่ 3.5 แผนผังการไหลของข้อมูลสำหรับการสร้างใหม่และปรับเทียบแบบออนไลน์ของ O^2

(ที่มา: ALICE computing:Technical Design Report [17])

บทที่ 4
โครงสร้างของสเตฟในระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในที่ปรับปรุงใหม่ในหัววัดอลิซ

เนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างสนับสนุน (สเตฟ) รวมถึงระบบระบายความร้อนสำหรับติดตั้งในระบบติดตามทางเดินอนุภาคในหัววัดอลิซที่ปรับปรุงใหม่ โดยใช้การจำลองแบบทางเรขาคณิต AliRoot

4.1 โครงสร้างสนับสนุน-สเตฟ

สเตฟ (Stave) เป็นองค์ประกอบชนิดคอมโพสิตที่สำคัญสำหรับการปรับปรุง ITS ที่ได้รับการออกแบบให้เป็นโครงสร้างการสนับสนุนสำหรับการติดตั้งชุดเซนเซอร์ในการตรวจจับอนุภาค มีส่วนประกอบดังนี้

- Space Frame คือ โครงนั่งร้านที่มีน้ำหนักเบาทำจากคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อรองรับอุปกรณ์ต่าง ๆ
- Cold Plate คือ แผ่นคาร์บอนที่ฝังหน่วยระบายความร้อน
- Hybrid Integrated Circuit คือ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิปเซนเซอร์ชนิดพิกเซล

ในงานนี้ได้ทำการศึกษาค่างบประมาณวัสดุของทั้งส่วนตรวจวัดชั้นในและชั้นนอก โดยสามชั้นในสุดจะใช้สเตฟแบบแถวเดี่ยว ส่วนของโครงสร้างทำจากสารประกอบเส้นใยคาร์บอนขึ้นรูปชนิด M60J 3K (588GPa) พันในลักษณะของโครงสร้างพีระมิดด้วยมุม 45° ตามแนวความยาวสเตฟ โดยมุมของการพันและจำนวนรอบที่พันนั้น ถูกปรับแต่งเพื่อให้เกิดความแข็งแรงคงทนมากที่สุด ในขณะที่ค่างบประมาณวัสดุมีค่าต่ำที่สุดด้วย

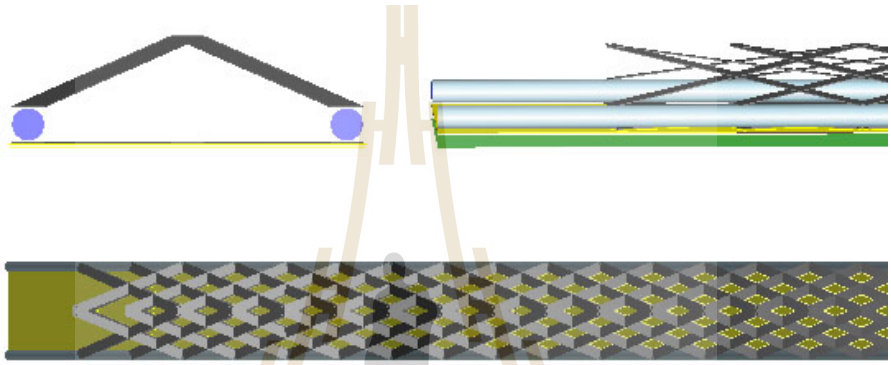
สำหรับระบบระบายความร้อนนั้น จะใช้แผ่นนำความเย็นเพื่อระบายความร้อนที่มาจากเซนเซอร์ แผ่นระบายความร้อนนี้ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดนำความร้อนสูงแบบลามิเนตโดยติดตั้งที่ด้านบนของเซนเซอร์ ความร้อนจะถูกนำไปที่ท่อทำความเย็นหรือไมโครแชนแนลที่ฝังอยู่ในแผ่นระบายความร้อนโดยบรรจุสารทำความเย็นเอาไว้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงสุดจึงได้มีการออกแบบระบบระบายความร้อนทั้งสิ้น 4 แบบที่มีลักษณะทางเรขาคณิตที่แตกต่างกัน

ในส่วนของโครงสร้างสนับสนุนได้ถูกออกแบบภายใต้ข้อจำกัดในเรื่องของรูปทรงของส่วนตรวจวัด ขนาดของเซนเซอร์ และเทคโนโลยีในการระบายความร้อน ดังนั้น จึงได้มีการออกแบบสเตฟจำนวนทั้งสิ้น 4 โมเดล ดังนี้[19]

4.2 แบบจำลองสเตฟโมเดล 0

โมเดลนี้เป็นโครงสร้างที่ทำจากเส้นใยคาร์บอนถักเป็นโครงพร้อมท่อระบายความร้อนที่ขอบทั้งสองด้าน เส้นใยคาร์บอนถักชนิด K13D2U ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. ที่ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างรองรับ

สามารถส่งผ่านความร้อนไปยังท่อระบายความร้อนทั้งสองได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 การใช้ใช้คาร์บอนชนิดนี้สามารถลดขนาดของโครงสร้างลงได้ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นที่สูงกว่า สามารถบิดงอได้มากขึ้นโดยที่ไม่เกิดการแตกหัก โครงสร้างของโมเดลนี้ สามารถลดน้ำหนักรวมของโครงสร้างลงได้มากในขณะที่ยังคงความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี โครงสร้างแบบพีระมิดที่สร้างโดยเส้นใยคาร์บอนจะมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับเซนเซอร์แบบซิลิคอนและโครงสร้างอื่น ๆ ของชั้นตรวจวัดชั้นในสุด โครงสร้างโดยรวมเหมาะสมกับระบบตรวจวัดที่ใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากระบบระบายความร้อนนี้ยังมีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้ไม่ดีนัก ซึ่งหากมีการเพิ่มขนาดของท่อระบายความร้อน จะยิ่งทำให้ค่างบประมาณวัสดุมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.1 แบบจำลองสเตฟโมเดล 0 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้เทคโนโลยีระบายความร้อนแบบท่อคู่ที่ขอบทั้งสองด้าน

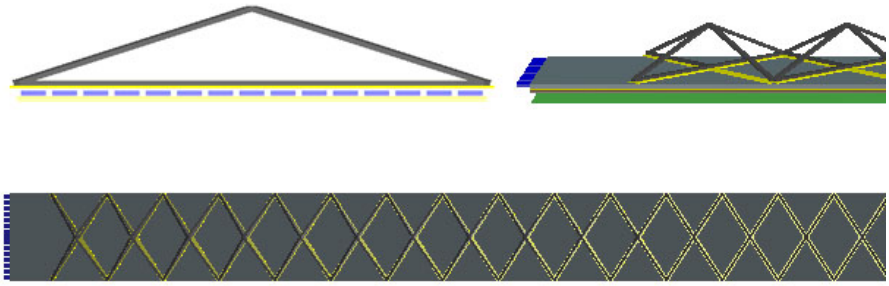
4.3 แบบจำลองสเตฟโมเดล 1

โมเดลนี้มีโครงสร้างที่ทำจากเส้นใยคาร์บอนถักพร้อมระบบระบายความร้อนแบบไมโครแชนแนลที่ทำจากโพลีไอไมด์ โดยโครงสร้างรองรับจะเป็นแบบเดียวกันกับโมเดล 0 แต่จะใช้ไมโครแชนแนลที่ทำจากโพลีไอไมด์เป็นระบบระบายความร้อนแทนแบบท่อเพื่อให้สามารถถ่ายเทความร้อนจากเซนเซอร์แบบพิกเซลได้ดีขึ้น ภายในไมโครแชนแนลซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 0.16 มม.^{2} จะใส่น้ำยาทำความเย็นชนิด monophase หรือ biphase ไว้เพื่อทำหน้าที่ระบายความร้อน ดังแสดงในรูปปที่ 4.2

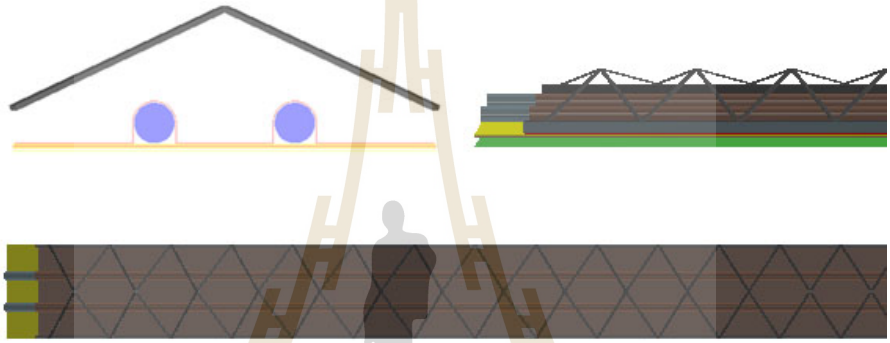
4.4 แบบจำลองสเตฟโมเดล 2

โมเดลนี้มีโครงสร้างที่มีเทคโนโลยีเดียวกันกับโมเดลก่อนหน้า แต่ใช้แผ่นคาร์บอนนำความร้อนพร้อมด้วยท่อโพลีไอไมด์ที่กลางแผ่น ทำให้สามารถระบายความร้อนได้ดีขึ้น แต่เนื่องจากการวางท่อที่กลางแผ่นจะต้องมีการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นคาร์บอน ดังนั้นจะทำให้มีค่างบประมาณวัสดุที่สูงขึ้น

ในโมเดลนี้ ได้มีการนำท่อระบายความร้อนที่มีรัศมีภายนอกต่างกันสองขนาดมาทดสอบ นั่นก็คือขนาด 0.15 มม. และ 0.10 มม. เพื่อเปรียบเทียบค่างบประมาณวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.2 แบบจำลองสเตฟโมเดล 1 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้เทคโนโลยีระบายความร้อนแบบไมโครแชนแนลที่ทำจากโพลีไอไมด์



รูปที่ 4.3 แบบจำลองสเตฟโมเดล 2 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้ท่อระบายความร้อนที่ทำจากโพลีไอไมด์ขนาดรัศมี 0.15 มม. ตรงกลาง

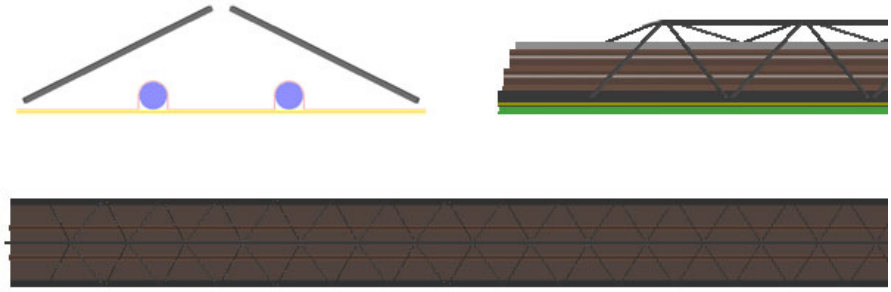
4.5 แบบจำลองสเตฟโมเดล 3

โมเดลนี้มีโครงสร้างเช่นเดียวกับโมเดล 1 แต่ใช้เทคโนโลยีระบายความร้อนแบบไมโครแชนแนลที่ทำจากซิลิกอนที่บรรจุสารระบายความร้อนไว้ด้านใน ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งถูกผลิตภายในห้องปลอดฝุ่น ณ ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพแห่งโลซาน และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ ประเทศไทย เนื่องจากความซับซ้อนในการผลิตและต้นทุนที่สูง โมเดลนี้จึงยังอยู่ในช่วงของการศึกษาและวิจัยเพื่อใช้สำหรับงานด้านอื่นต่อไป

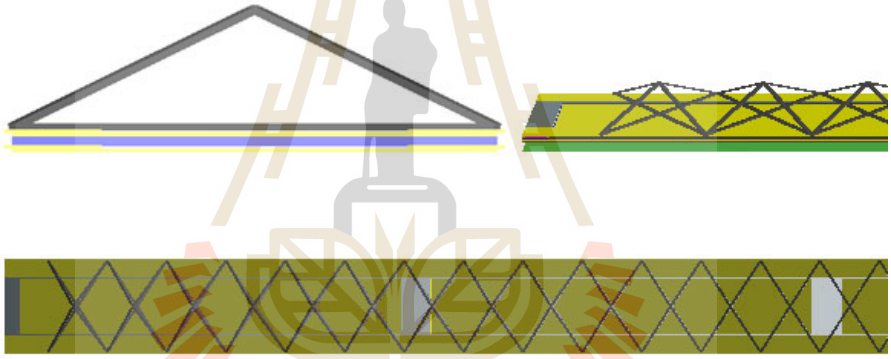
4.6 แบบจำลองสเตฟโมเดล 4

โมเดลนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากโมเดลที่ 2 โดยใช้ท่อระบายความร้อนขนาด 1.0 มม. แต่ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างให้มีความสมมาตรมากขึ้นและปรับขนาดเพื่อให้เหมาะสมกับส่วนตรวจวัดชั้นนอก ดังรูปที่ 4.6

ทุก โมเดล จะ ถูก สร้าง เป็น แบบ จำลอง ทาง เรขาคณิต ด้วย โปรแกรม AliRoot เพื่อ คำนวณ ค่า งบประมาณวัสดุของแต่ละโมเดล และทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่างบประมาณวัสดุดังกล่าว ผลการจำลองแบบและวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุ จะถูกส่งไปยังผู้รับผิดชอบโครงการในการพิจารณาผลิตต้นแบบเพื่อใช้ในการปรับปรุงระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในของหัววัดอลิซต่อไป

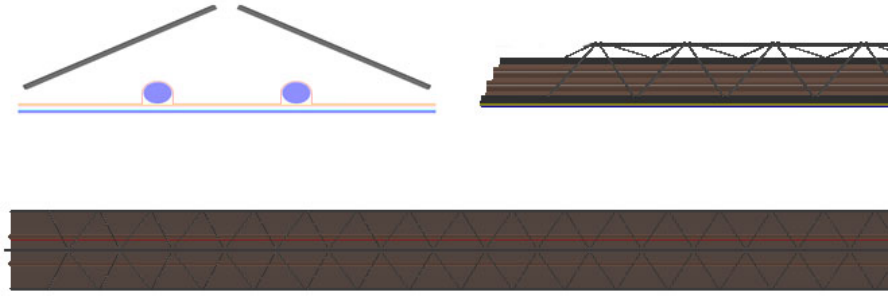


รูปที่ 4.4 แบบจำลองสเตฟโมเดล 2 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้ท่อระบายความร้อนที่ทำจากโพลีไอไมด์ขนาดรัศมี 0.10 มม. ตรงกลาง



รูปที่ 4.5 แบบจำลองสเตฟโมเดล 3 ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และใช้ระบบระบายความแบบไมโครแชนแนลที่ทำจากซิลิกอน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



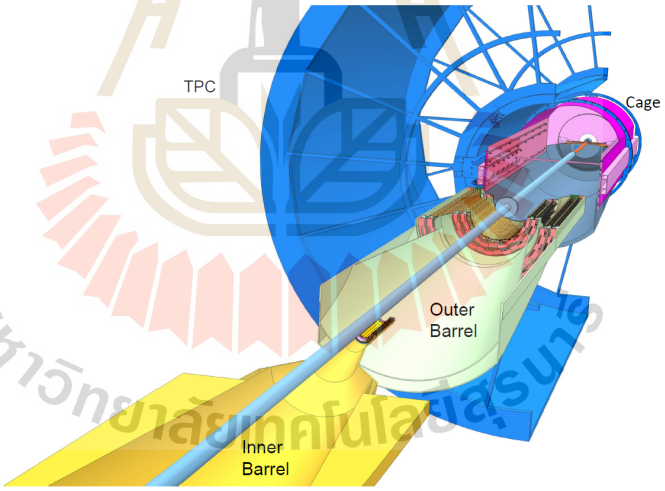
รูปที่ 4.6 แบบจำลองสเตฟโมเดล 4 ที่ทีการพัฒนามาจากโมเดล 2

บทที่ 5
การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างบริการและโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

เนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของโครงสร้างบริการและโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง โดยการสร้างเป็นแบบจำลองทางเรขาคณิตโดยใช้โปรแกรม AliRoot

5.1 โครงสร้างบริการ

ทั้งชั้นตรวจวัดชั้นในและชั้นนอก จะถูกยึดไว้บนโครงสร้างรองรับรูปกรวยที่เรียกว่า โครงสร้างบริการ (Service Barrel) โดยโครงสร้างดังกล่าวได้ถูกแบ่งครึ่งตามแนวยาวของทรงกระบอกเพื่อสะดวกในการติดตั้งและซ่อมบำรุง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ทั้งนี้ ส่วนขอบของโครงสร้างบริการจะมีการติดตั้งวงล้อขอบ (End-Wheel) เพื่อใช้ยึดปลายทั้งสองข้างของสเตฟ ในส่วนของตัวโครงสร้างบริการ (ถัดจากวงล้อขอบ) จะทำหน้าที่รองรับอุปกรณ์อื่น ๆ รวมถึงสายนำกระแส สายนำสัญญาณและท่อใส่สารหล่อเย็น

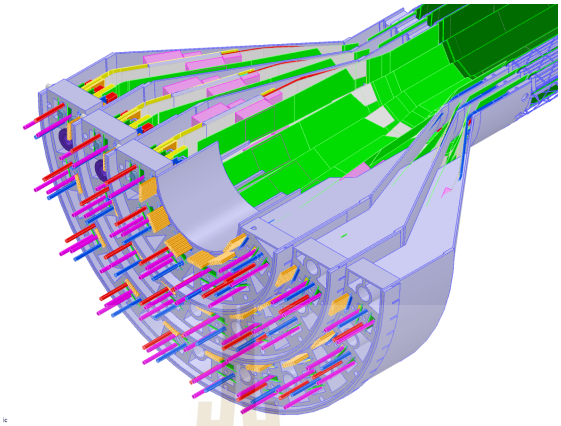


รูปที่ 5.1 แบบแสดงชั้นตรวจวัดที่ประกอบกับโครงสร้างบริการ
(ที่มา: Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System [10])

5.2 โมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

เนื่องจากความต้องการที่จะลดความยาวของท่อบรรจุสารหล่อเย็นและสายไฟที่ต่อเข้ามายังสเตฟ โมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงจึงถูกนำเข้ามาติดตั้งบริเวณวงล้อขอบของโครงสร้างบริการสำหรับชั้นตรวจวัดชั้นในสุด ซึ่งจะมีส่วนที่ยื่นออกมานอกโครงสร้างบริการ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ส่วนที่ยื่นออกมานั้นจะอยู่ในบริเวณของการตรวจวัดอนุภาค (Sensitive Region) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการ

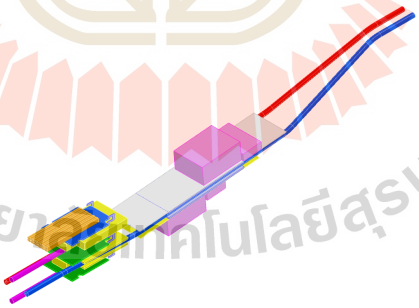
คำนวณหาจุดพิกัดของอนุภาคทุติยภูมิ [20] ดังนั้นจะต้องมีการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าว



รูปที่ 5.2 แบบแสดงครึ่งวงรอบของโครงสร้างบริการวงในที่โมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง ของระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในที่ปรับปรุงใหม่

(ที่มา: Corrado, 3D (STP) 20151110_IB)

วงล้อขอบที่ใช้รองรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงนั้นทำจากคาร์บอนไฟเบอร์ มีลักษณะเป็นรูปกรวยจำนวนสามชั้นเพื่อให้สอดคล้องกับชั้นตรวจวัดชั้นในสุดที่มีสามชั้น โมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งโมดูลจะต่อเข้ากับสเตฟหนึ่งตัว โดยแต่ละโมดูลจะประกอบด้วยตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC/DC Converter Module) จำนวนสองตัว ท่อร้อนและท่อหล่อเย็น แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน และขั้วสำหรับเชื่อมต่อกับวงจรภายนอก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แบบแสดงรายละเอียดของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

(ที่มา: Corrado, 3D (STP) 20151110_IB)

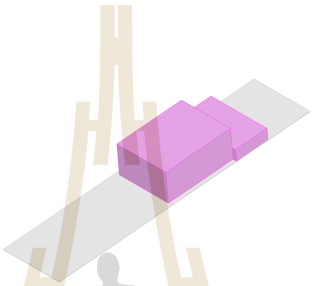
ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้คือ FEASTME_CLP [21] ที่มีคุณสมบัติในการทนต่อรังสีและสนามแม่เหล็ก เนื่องจากตัวแปลงนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก การคำนวณค่างบประมาณจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองเรขาคณิตลงในโปรแกรม AliRoot [22] จากนั้นจะระบุรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในแต่ละส่วนแยกกันเป็นคลาส (AliROOT::AliModule) โดยแบ่งตามประเภทดังนี้

- *วัสดุเนื้อเดียว* คือ วัสดุที่มีธาตุชนิดเดียวเป็นองค์ประกอบ
- *วัสดุเนื้อผสม* คือ วัสดุที่ธาตุหลายชนิดเป็นองค์ประกอบ

5.2.1 รายละเอียดของวัสดุที่ใช้

ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งตัว จะประกอบด้วยวัสดุเนื้อผสมจำนวนสามคลาส ได้แก่ PCB SHIELD และ PASSIVE ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดย PCB คือวัสดุเนื้อสำหรับทำแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) ซึ่งจะประกอบไปด้วย

- FR-4 ใช้ทำแผ่นรองรับลายวงจร
- CU ใช้เป็นลายวงจร



รูปที่ 5.4 แบบแสดงตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วยวัสดุเนื้อผสมสามคลาส โดยวัสดุรูปกล่องสีเทาคือ PCB สีชมพูขนาดใหญ่คือ SHIELD และสีชมพูขนาดเล็กคือ PASSIVE

(ที่มา: Corrado, 3D (STP) 20151110_IB)

ส่วนถัดมาคือ SHIELD เป็นวัสดุเนื้อผสมสำหรับวงจรรวมบริเวณขดลวดเหนี่ยวนำรวมถึงกล่องครอบ ซึ่งประกอบด้วย

- CU คือ ทองแดง ใช้ในขดลวดและเคลือบที่กล่องครอบ
- PE คือ พลาสติกโพลีเอทีลีน (polyethylene) ใช้ในแกนขดลวดและโครงกล่องครอบ
- ตัวเหนี่ยวนำ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ
- อากาศที่อยู่ในบริเวณที่ว่างในกล่องครอบ

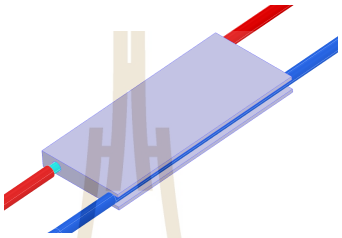
ส่วน PASSIVE คือวัสดุเนื้อผสมสำหรับวงจรรวมบริเวณขั้วเชื่อมต่อ (connector) ซึ่งประกอบด้วย

- CU คือ ทองแดง ใช้ในแผงวงจรรวมขนาดเล็ก (ASIC) และขั้วเชื่อมต่อ
- PE คือ พลาสติกโพลีเอทีลีน (polyethylene) ใช้ในขั้วเชื่อมต่อ
- ตัวเหนี่ยวนำ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ
- อากาศที่อยู่ในบริเวณที่ว่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในหนึ่งโมดูลจะใช้ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงสองตัวประกบบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ประกอบด้วย

- PLATE คือ แผ่นอลูมิเนียมที่ใช้นำความร้อนจากตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรง
- PIPE คือ ท่อนำสารหล่อเย็นที่ทำด้วย Polyethylene
- WATER คือ ตัวอย่างของสารหล่อเย็นที่ใช้ในการคำนวณนี้

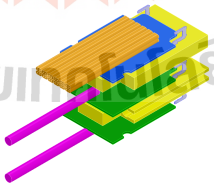


รูปที่ 5.5 แบบแสดงแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (สีเทา) ท่อหล่อเย็น (สีแดง กับ สีน้ำเงิน) สำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งหน่วย

(ที่มา: Corrado, 3D (STP) 20151110_IB)

สำหรับส่วนขั้วเชื่อมต่อวงจรภายนอกที่แสดงในรูป 5.6 นั้นมีองค์ประกอบดังนี้

- CU คือ ทองแดง ใช้ในท่อนำกระแสและสัญญาณไฟฟ้า รวมทั้งวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- PLATE คือ แผ่นอลูมิเนียมที่ใช้นำความร้อนจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนขั้วหัววัด
- PCB คือ แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้



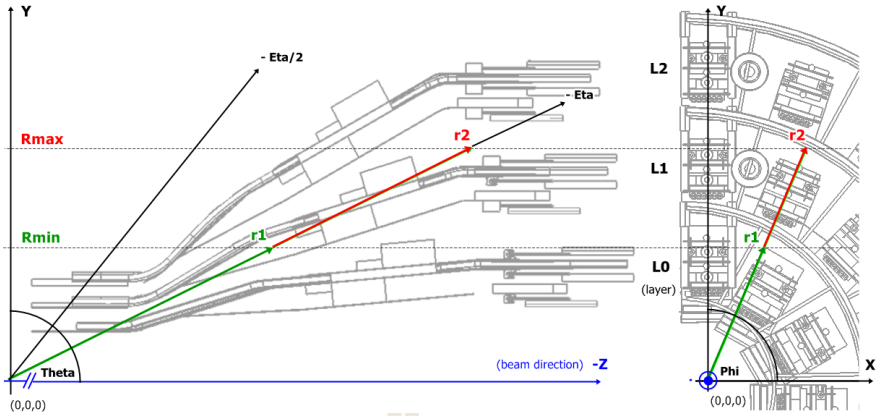
รูปที่ 5.6 แบบแสดงขั้วเชื่อมต่อภายนอก สำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

(ที่มา: Corrado, 3D (STP) 20151110_IB)

5.2.2 แบบจำลองที่เสร็จสมบูรณ์

โมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่เสร็จสมบูรณ์จะถูกวางในแบบจำลองทางเรขาคณิตในโปรแกรม AliRoot ดังแสดงในรูปที่ 5.7

แบบจำลองได้ถูกสร้างและส่งขึ้นไปยังฐานข้อมูลของโปรแกรม AliRoot เมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม 2558 [23] แสดงดังรูปที่ 5.8 โดยมีชื่อคลาสฟังก์ชั่นสำหรับเรียกใช้งานดังนี้

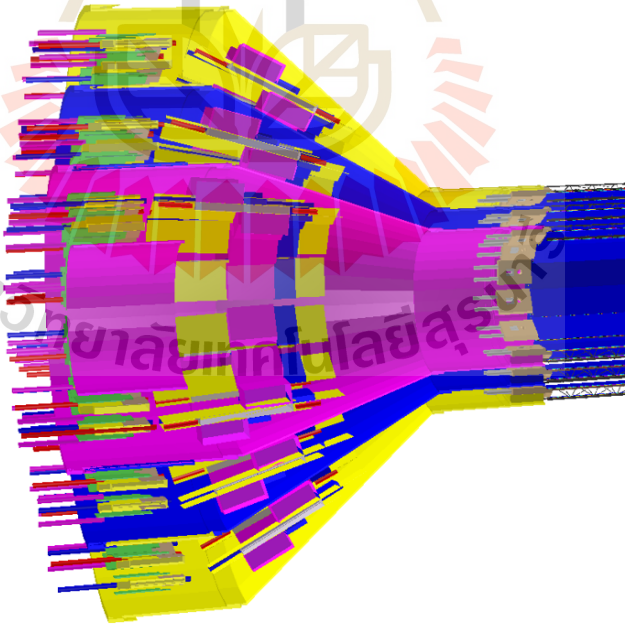


รูปที่ 5.7 แบบแสดงการวางโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงตามแนวยาว (ซ้าย) และแนวภาคตัดขวาง (ขวา)

(ที่มา: Corrado, 3D (STP) 20151110_IB)

– ส่วนวงล้อขอบของส่วนตรวจวัดชั้นในและโครงสร้างสนับสนุน
`AliITSUv2Layer::CreateInnerBEWheelA3(...)`

– ส่วนของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง
`AliITSUv2Layer::CreateInnerDCDCLayer3(...)`.



รูปที่ 5.8 แบบจำลองทางเรขาคณิตที่ถูกสร้างขึ้นด้วยในโปรแกรม AliRoot

(ที่มา: P. Namwongsa, 2015)

บทที่ 6
การคำนวณค่างบประมาณวัสดุ

เนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงค่าความยาวรังสี (radiation length, X_0) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุฟิสิกส์ของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเนื้อวัสดุที่วิ่งผ่านซึ่งมีผลต่อค่าความยาวรังสี และค่างบประมาณวัสดุ (material budget, X/X_0) รวมทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

6.1 หลักการและวัตถุประสงค์

หลักในการตรวจวัดอนุภาคในหัววัด คือการให้อนุภาคนั้น ๆ วิ่งผ่านตัวกลางของหัววัดแล้ววัดค่าพลังงานที่สูญเสียจากการทำอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับตัวกลางออกมา โดยสำหรับอนุภาคที่มีประจุนั้นจะเกิดอันตรกิริยาดังนี้

- การเกิดเป็นไอออน (Ionization) และการถูกกระตุ้น (Excitation)
- เบรมสตราลัง (Bremsstrahlung)
- การแผ่รังสีชีเรนคอฟ (Cherenkov radiation)
- การแผ่รังสีที่รอยต่อ (Transition ratiation)

สำหรับอนุภาคโฟตอน (ไม่มีมวลและไม่มีประจุ) นั้นจะเกิดอันตรกิริยาดังนี้

- ปรากฏการณ์โฟโต้อิเล็กทริก (Photoelectric effect)
- การกระเจิงคอมพ์ตัน (Compton scattering)
- การเกิดคู่ (Pair production)

ปริมาณทางฟิสิกส์ที่บ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะของสสารที่มีต่ออนุภาคที่วิ่งผ่านคือ ค่าความยาวรังสี (radiation length, X_0) และ ค่างบประมาณวัสดุ (material budget, x/X_0) ซึ่งเป็นปริมาณที่ปรากฏอยู่ในสมการการสูญเสียพลังงานของอันตรกิริยาหลัก ซึ่งในรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะอันตรกิริยาที่มีสมการการสูญเสียพลังงงานขึ้นกับค่าความยาวรังสี และมีผลกระทบถึงประสิทธิภาพการตรวจวัดของหัววัดโดยตรง

วัตถุประสงค์ของการคำนวณค่างบประมาณวัสดุโดยใช้แบบจำลองเรขาคณิต คือการเปรียบเทียบผลลัพท์ของแบบจำลองกับค่าที่คาดการณ์ไว้ในรายงานการออกแบบทางเทคนิค (Technical Design Report [10]) และเพื่อแสดงถึงผลลัพท์โดยละเอียดในแนวตัดขวางอันซึ่งไม่สามารถแสดงจากการคำนวณแบบปกติได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6.2 ความยาวรังสี

สำหรับกระบวนการเบรมสตราลุง ค่าความยาวรังสี X_0 คือระยะที่อนุภาคอิเล็กตรอนความเร็วสูงวิ่งผ่านตัวกลาง แล้วมีพลังงานลดลงเป็นสัดส่วนกับ $\frac{1}{e}$ หรือในกรณีของการเกิดคู่ ค่าความยาวรังสีจะมีค่าเป็น $\frac{7}{9}$ เท่าของระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาคโฟตอนพลังงานสูงเคลื่อนที่ได้ ค่าความยาวรังสีมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร (g cm^{-2}) ซึ่งค่าความยาวรังสีของสสารที่มีเลขอะตอมไม่เกิน 92 ได้ถูกคำนวณไว้แล้วโดย Y.-S. Tsai [24] ตารางที่ III.6 ดังสมการ

$$\frac{1}{X_0} = 4\alpha r_e^2 \frac{N_A}{A}\{Z^2[L_{\text{rad}} - f(Z)] + ZL'_{\text{rad}}\} \tag{6.1}$$

โดยที่

α คือ ค่าคงที่โครงสร้างละเอียด (fine-structure constant) ที่มีค่าโดยประมาณเท่ากับ $\frac{1}{137}$

r_e คือ รัศมีของอิเล็กตรอน

Z คือ เลขอะตอม กับ A คือเลขมวลของนิวเคลียสในสสาร

L_{rad} กับ L'_{rad} คือ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางนิวเคลียร์ของอะตอมที่ถูกชนซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสสาร ดังแสดงในตารางที่ 6.1

$f(Z)$ คือ ฟอร์มแฟคเตอร์ คำนวณโดย H. Davies [25]

ตารางที่ 6.1 ปริมาณ L_{rad} และ L'_{rad} สำหรับคำนวณหาค่าความยาวรังสี

ธาตุ	Z	L_{rad}	L'_{rad}
H	1	5.31	6.144
He	2	4.79	5.621
Li	3	4.74	5.805
Be	4	4.71	5.924
อื่น ๆ	> 4	$\ln(184.15\ Z^{-1/3})$	$\ln(1194\ Z^{-2/3})$

(ที่มา: Pair Production and Bremsstrahlung of Charged Leptons [24])

เมื่อแทนค่าตัวแปรของอนุภาคที่เข้าชนด้วยอิเล็กตรอน แล้วทำการเชื่อมโยงสมการดังกล่าวกับผลการทดลอง (Dahl's private communication with PDG2006 [26]) จะได้

$$X_0 = \frac{716.4\ A}{Z(Z+1)\ \ln(287/\sqrt{Z})}\ \text{g cm}^{-2} \tag{6.2}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในกรณีที่สสารเป็นวัสดุเนื้อผสม ค่างบประมาณวัสดุจะคำนวณได้จาก

$$\frac{1}{X_0} = \sum_i w_i \left(\frac{1}{X_0}\right)_i \tag{6.3}$$

เมื่อ w_i คือสัดส่วนน้ำหนัก (weight fraction) ของสสาร i ในวัสดุผสมนั้น ๆ

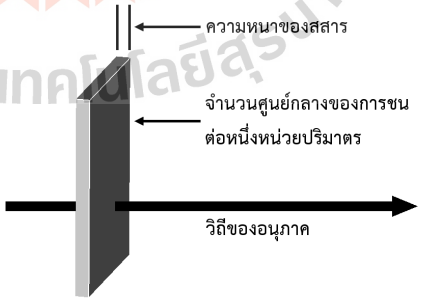
ในการพิจารณาค่างบประมาณวัสดุในสเตฟ จะเริ่มต้นพิจารณาจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านวัสดุ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่เกิดจากการชนกับนิวคลีไอในอะตอมของวัสดุ จะส่งผลต่อการตรวจวัดอนุภาคดังกล่าว ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

6.3 ภาคตัดขวาง (cross section) และระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path)

ถ้าอนุภาคใดๆ เคลื่อนที่ผ่านสสาร การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคนั้นๆ และนิวเคลียสหรืออิเล็กตรอนทั้งหลายที่อยู่ในสสารจะสามารถหาได้เป็นค่าความน่าจะเป็นค่าหนึ่ง ในสสารที่มีขนาดบางมาก ค่าความน่าจะเป็นข้างต้นจะแปรผันตรงกับความหนาของสสารและจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร cross section เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้วัดความน่าจะเป็นของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและสสารได้ หากอนุภาควิ่งผ่านในแนวตั้งฉากกับวัตถุที่มีขนาดบางมาก ความน่าจะเป็นของการเกิดอันตรกิริยาคือ

$$dW = dxN\sigma \tag{6.4}$$

โดย dW คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและสสาร dx คือ ความหนาในส่วนที่บางที่สุดของวัตถุ N คือ จำนวนของศูนย์กลางของการชนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เรียกสมการที่ 6.4 ว่าภาคตัดขวาง (cross-section) ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ภาพประกอบนิยามของ cross section

ภาคตัดขวาง มีหน่วยเป็น cm^2 หรือ $barn$ ในฟิสิกส์อนุภาค $1barn = 10^{-24}cm^2$ คำว่า “cross section” นั้นมีที่มาจากกลศาสตร์ดั้งเดิม ซึ่งนิยามมาจากพื้นที่บนระนาบที่ผ่านจุดศูนย์กลางของลูกบอลสองลูกในปัญหาของการชนกันของอนุภาคแบบจุด

ถ้าลำแสงของอนุภาควิ่งชนกับวัตถุ จำนวนของอนุภาคที่ได้รับผลกระทบจากลำแสงนั้นจะเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการชนกันระหว่างลำแสงของอนุภาคและนิวเคลียสในวัตถุ เพื่อที่จะอธิบายถึงอันตรกิริยาดังกล่าว จะกำหนดให้ $P(x)$ เป็นความน่าจะเป็นของอนุภาคซึ่งเกิดปฏิกิริยาหลังจากเดินทางเข้าไปในวัตถุ

เป็นระยะทาง x จะได้ $P(0) = 0$ จากนิยามของ cross section ในสมการที่ 6.4 และความสัมพันธ์ของ $P(x + \Delta X)$ และ $P(x)$ ดังนี้

$$P(x + \Delta x) = P(x) + [1 - P(x)]N\sigma\Delta x \tag{6.5}$$

$$\frac{P(x + \Delta x) - P(x)}{\Delta x} = [1 - P(x)]N\sigma \tag{6.6}$$

เมื่อ Δx คือระยะทางสั้นๆในทิศทาง x หากกำหนดให้ลิมิตของ $\Delta X \to 0$ จะได้สมการอนุพันธ์เป็น

$$\frac{dP(x)}{dx} = [1 - P(x)]N\sigma \tag{6.7}$$

$$\frac{d[1 - P(x)]}{dx} = -[1 - P(x)]N\sigma \tag{6.8}$$

คำตอบของสมการอนุพันธ์ ที่มีเงื่อนไขขอบเป็น $[1 - P(0)] = 1$ คือ

$$[1 - P(x)] = e^{-xN\sigma} \tag{6.9}$$

ฟังก์ชั้นของความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของอนุภาคหลังจากวิ่งไปเป็นระยะทาง x ในสสาร คือ

$$W(x) = [1 - P(x)]N\sigma = e^{-xN\sigma}N\sigma \tag{6.10}$$

ดังนั้น mean free path (λ) ของอนุภาคก่อนการชนครั้งแรก สามารถอธิบายได้โดย

$$\lambda = \int_0^\infty W(x)xdx = \int_0^\infty e^{-xN\sigma}xN\sigma dx \tag{6.11}$$

$$= \frac{1}{N\sigma}\int_0^\infty e^{-x}xdx = \frac{1}{N\sigma} \tag{6.12}$$

ถ้าวัตถุประกอบด้วยประเภทของศูนย์กลางของการชนสองแบบ กล่าวคือ X กับ Y สมการด้านบนจะสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้เป็น

$$\lambda = \frac{1}{N_x\sigma_x + N_y\sigma_y} \tag{6.13}$$

และ

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_X} + \frac{1}{\lambda_Y} \tag{6.14}$$

โดยที่

$$\lambda_X = \frac{1}{N_X\sigma_X},\ \lambda_Y = \frac{1}{N_Y\sigma_Y}$$

เมื่อ N_X และ N_Y คือ จำนวนศูนย์กลางของการชนต่อหน่วยปริมาตรของสสารแต่ละประเภท

ถ้าเราพิจารณาการชนกันของนิวเคลียสในอะตอมต่างๆ จะได้ว่า

$$N = \frac{\rho N_A}{A_r} \tag{6.15}$$

เมื่อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

N คือ จำนวนอะตอมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้ำหนักเชิงสัมพัทธ์ของอะตอม

A_r คือ น้ำหนักสัมพัทธ์ของอะตอม

N_A คือ เลขอะโวกาโดร

ρ คือ ความหนาแน่น

อนุภาคสามารถมีรูปแบบของอันตรกิริยาได้หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น โปรตอนสามารถชนแบบยืดหยุ่นกับนิวเคลียส หรือชนแล้วทำให้นิวคลีไออยู่ในสถานะกระตุ้น ดังนั้น cross section จะสัมพันธ์กับอันตรกิริยาแบบเฉพาะเจาะจงที่เรียกว่า partial cross section และผลรวมของทุก partial cross section เรียกว่า total cross section นอกจากนี้ เรายังสามารถพิจารณา partial cross section ในกรณีที่โปรตอนถูกชนในทิศทางที่เฉพาะเจาะจง เรียกว่า differential cross section และมักจะถูกเขียนเป็น $d\sigma/d\Omega$ โดยที่ $d\Omega = sin\theta d\theta d\phi$ ดังนั้น total cross section ของระบบจะเขียนเป็น

$$\sigma_{tot} = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \tag{6.16}$$

6.4 การสูญเสียพลังงานของอนุภาคมีประจุอันเนื่องมาจากอันตรกิริยากับอิเล็กตรอน

เมื่ออนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ผ่านสสารจะทำให้เกิดอันตรกิริยาโดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า และอาจเกิดอันตรกิริยานิวเคลียร์ได้ หากอนุภาคนั้นคือ โปรตอน อนุภาคอัลฟ่า หรือ หรืออนุภาคมีประจุฮาดรอนต่างๆ (ในบทนี้เราจะไม่พิจารณาการเกิดอันตรกิริยานิวเคลียร์) พลังงานที่สูญเสียของอนุภาคเขียนได้ดังนี้

$$\Delta E_{max} = \frac{1}{2} m v^2 \left(\frac{4mM}{(m+M)^2} \right) \tag{6.17}$$

$$\Delta E_{max} \approx \frac{1}{2} m v^2 (4\frac{m}{M}) \qquad (m \ll M) \tag{6.18}$$

เมื่อ

$$\frac{dn}{dE} \propto \frac{1}{E^2} \tag{6.19}$$

จะได้

$$\frac{dE}{dx} = \rho \frac{Z_{nucl}}{A_r} (0.307 \text{MeVcm}^2/\text{g}) \frac{Z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta)}{2} \right) \right] \tag{6.20}$$

โดยที่

dE/dx คือ พลังงานที่สูญเสียของอนุภาตต่อหนึ่งหน่วยความยาว

Z คือ ค่าประจุของอนุภาคหารด้วยค่าประจุของโปรตอน

c คือ ความเร็วของแสง

$\beta\gamma$ คือ ผลกระทบของความหนาแน่นที่แปรเปลี่ยนตามความเร็วอนุภาค

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของวัตถุ

Z_{nucl} คือ ค่าประจุที่ไม่มีมิติของนิวเคลียส

A_r คือ น้ำหนักสัมพัทธ์ของอะตอม

$\delta\beta$ คือ พจน์ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น

จะได้ว่า

$$\frac{dE}{dx} \approx \rho(2\text{MeVcm}^2/\text{g})\frac{Z^2}{\beta^2} \tag{6.21}$$

6.5 การสูญเสียพลังงานจากการไอออนไนเซชั่น

อนุภาคมีประจุที่มีพลังงานในระดับปานกลาง เมื่อเข้าชนตัวกลาง จะเกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของการเกิดไอออไนเซชั่น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการของ Bethe [27] ดังนี้

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = Kz^2\frac{Z}{A}\frac{1}{\beta^2}\left[\frac{1}{2}\ln\frac{2m_ec^2\beta^2\gamma^2W_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2}\right], \tag{6.22}$$

โดยที่

$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \approx 0.307075$ MeV mol^{-1} cm^2

z คือ ค่าประจุของอนุภาคที่เข้าชน

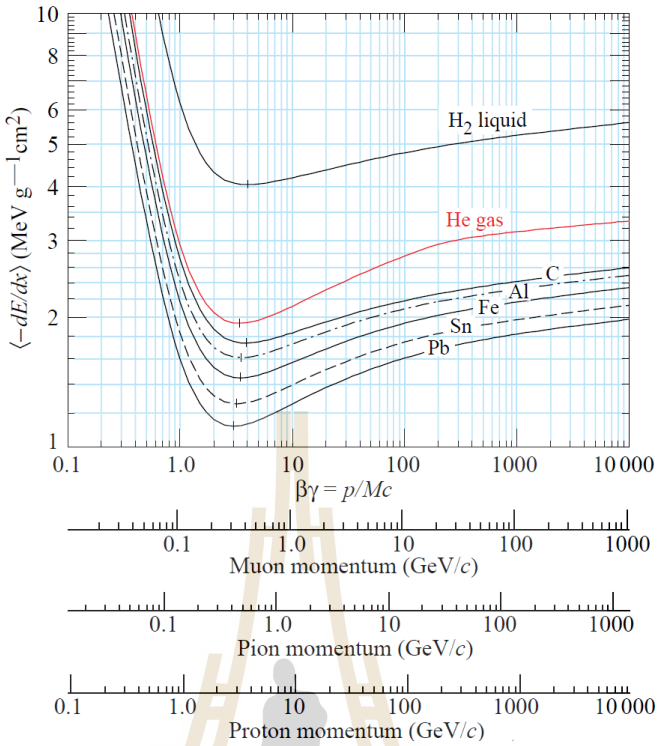
γ คือ ตัวประกอบ Lorentz และ $\beta = v/c$ (v คือความเร็วอนุภาค c คือความเร็วแสง)

$\delta(\beta\gamma)$ คือ ฟังก์ชันที่เกิดจากผลกระทบของความหนาแน่นที่แปรเปลี่ยนตามความเร็วอนุภาค (ในที่นี่ใช้การคำนวณของ Sternheimer [28])

W_{max} คือ ปริมาณพลังงานสูงสุดที่ถูกถ่ายโอนในการชนต่อครั้ง

พลังงานที่สูญเสียนี้มีชื่อเรียกว่า กำลังงานหยุดมวล (mass stopping power) มีหน่วยเป็น MeV g^{-1} cm^2 ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของสสาร ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6.2

ในกรณีที่อนุภาคที่เข้าชนมีพลังงานต่ำ กำลังงานหยุดมวลของอนุภาคประจุลบจะมีค่าต่ำกว่าของอนุภาคประจุบวก ซึ่งค่าผลกระทบนี้ถูกคำนวณโดย Barkas [29] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.3 ทั้งนี้ สมการที่ 6.22 ยังรวมถึงผลกระทบของ Bloch และผลกระทบแบบ shell ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ใน Ziegler [30]



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างของค่ากำลังงานหยุดมวลในกระบวนการไอออไนเซชั่นที่แตกต่างกันในสสารแต่ละชนิด สำหรับอนุภาคมิวออน ไพออน และโปรตอน ใน bubble chamber

(ที่มา: Review of Particle Physics [27])

6.6 การสูญเสียพลังงานจากเบรมสตราลังและการเกิดคู่

นอกจากการสูญเสียพลังงานจากไอออนไนเซชั่นแล้ว อนุภาคพลังงานสูงที่มีประจุยังมีการสูญเสียพลังงานจากเบรมสตราลังในสนามคูลอมบ์ของอนุภาคในอะตอม [31] เบรมสตราลังคือกระบวนการที่อนุภาคที่มีประจุเปล่งรังสีจากการลดความเร่งหลังถูกเบี่ยงเบนด้วยอนุภาคที่มีประจุในอะตอมที่อยู่ในเนื้อสสาร โดยในกรณีนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์กำบัง (screening effect) ของอิเล็กตรอนในสสารและจะถูกนำมาคำนวณด้วย ส่งผลให้ค่าภาคตัดขวางรวมของกระบวนการจะมีค่าลดลงในขณะที่ค่าความยาวรังสีมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสเปกตรัมของเบรมสตราลังถูกคำนวณโดยสมการ

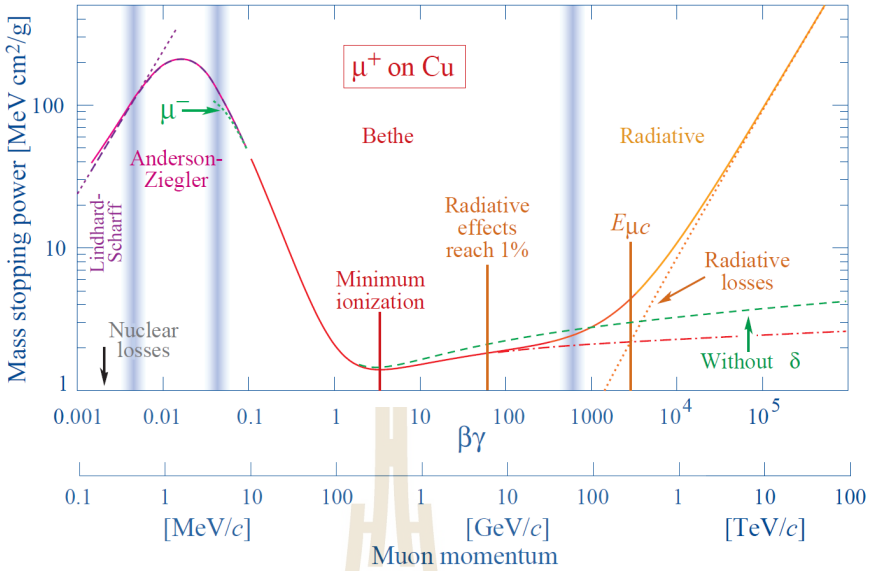
$$\frac{d\sigma}{dk} = \frac{A}{X_0 N_A k}\left(\frac{4}{3} - \frac{4}{3}y + y^2\right) \tag{6.23}$$

โดยที่

σ คือ ค่าส่วนตัดขวางของอันตรกิริยา (interaction cross section)

k คือ พลังงานของอนุภาคที่เข้าชน

$y = k/E$ คือ สัดส่วนที่พลังงานของอิเล็กตรอนที่เข้าชนกับโฟตอนที่เปล่งออกมา



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงค่ากำลังงานหยุดมวลจากสมการของ Bethe สำหรับมิวออนประจุบวกในทองแดงเทียบกับปริมาณ $\beta\gamma$ โดยที่เส้นทึบคือค่าปริมาณรวม แถบแนวตั้งจะถูกใช้แบ่งช่วงของการพิจารณา เส้นจุดสีเขียว คือ ค่าของมิวออนประจุลบที่คำนวณโดยคำนึงถึงผลกระทบ [29]

(ที่มา: Review of Particle Physics [27])

ซึ่งหลังจากการคำนวณโดยละเอียดรวมถึงปรากฏการณ์ Landau-Pomeranchuk-Migdal การหยุดยั้งไดอิเล็คทริก การกำบังสมบูรณ์ และการประมาณค่าพลังงานวิกฤติ [27] พลังงานสูญเสียจากอิเล็กตอนชนกับสสารสามารถลดรูปได้ดังสมการ

$$E(x) = E_0 \, \mathrm{e}^{-x/X_0} \tag{6.24}$$

ในส่วนของอนุภาคพลังงานสูงที่ไม่มีประจุหรือโฟตอน พลังงานที่สูญเสียที่เพิ่มขึ้นมานั้นโดยมากเป็นผลจากกระบวนการเกิดคู่ ซึ่งถูกประมาณการได้จากสมการ

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{A}{X_0 N_A}\left[1 - \frac{4}{3}x(1-x)\right] \tag{6.25}$$

โดยที่

k คือ พลังงานของโฟตอนที่เข้าชน

$x = E/k$ คือ สัดส่วนที่พลังงานของโฟตอนที่เข้าชนกับคู่ของอิเล็กตรอน (หรือโปสิตรอน) ที่เกิดขึ้น

หรือสามารถลดรูปได้ดังสมการ

$$\sigma = \frac{7}{9}\left(\frac{A}{X_0 N_A}\right) \tag{6.26}$$

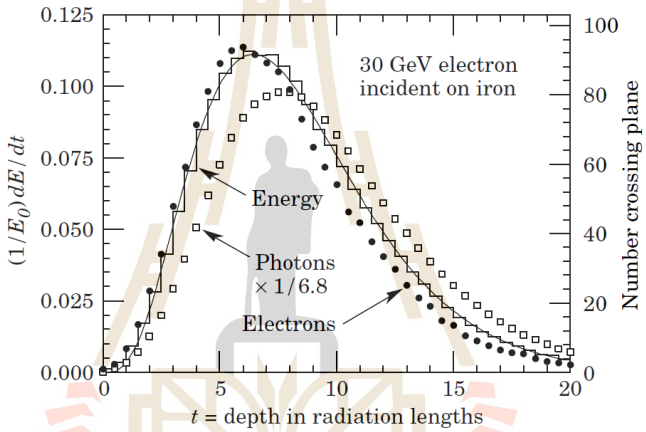
6.7 การสูญเสียพลังงานจากฝอยแม่เหล็กไฟฟ้า

ในตัวกลางที่มีความหนา อิเล็กตรอนและโฟตอนที่มีพลังงานสูงจะสร้างฝอยแม่เหล็กในเนื้อสาร ซึ่งค่าพลังงานที่สูญเสียเป็นฟังก์ชั่นของค่าความยาวรังสี ดังสมการ

$$\frac{dE}{dt} = E_0\, b\, \frac{(bt)^{a-1}e^{-bt}}{\Gamma(a)} \quad , t = x/X_0 \tag{6.27}$$

โดยที่ a และ b คือตัวแปรอิสระ และ $\Gamma(a)$ คือฟังก์ชั่นแกมม่าที่สอดคล้องกับผลการทดลอง

ทั้งนี้ ได้แสดงตัวอย่างการจำลองผลของการทดลอง EGS4 ในรูปที่ 6.4 เพื่อแสดงให้เห็นอิทธิพลของฝอยแม่เหล็กที่มีต่อความยาวรังสีในรูปของค่าการสูญเสียพลังงาน



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงการจำลองผลของการทดลอง EGS4 ของฝอยที่เกิดจากการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนในเหล็ก แสดงให้เห็นความแตกต่างของพลังงานที่สูญเสียของโฟตอน (สี่เหลี่ยม) และอิเล็กตรอน (จุด)
(ที่มา: Review of Particle Physics [27])

6.8 การเบี่ยงเบนทิศทางจากการกระเจิงหลายจุด

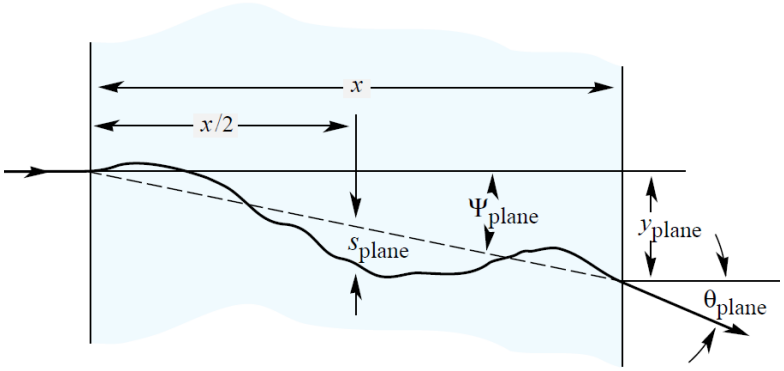
อนุภาคที่มีประจุเมื่อวิ่งผ่านตัวกลางที่มีความหนา จะเกิดการเบี่ยงเบนทิศทางหลายครั้งจากอันตรกิริยาคูลอมบ์ในนิวคลีไอ ซึ่งทฤษฎีของ Molière [32] สามารถคำนวณค่ามุมกระเจิงปลายทาง (แสดงในรูปที่ 6.5) ได้ดังสมการ

$$\theta_{\text{plane}} = \frac{13.6\ \text{MeV}}{\beta cp} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038\ \ln\frac{x}{X_0}\right] \tag{6.28}$$

โดยที่

x/X_0 คือ ความหนาของตัวกลางในสัดส่วนของความยาวรังสี

p คือ โมเมนตัมของอนุภาคที่เข้าชน



รูปที่ 6.5 แผนผังแสดงการเบี่ยงเบนทิศทางของอนุภาคจากการกระเจิงหลายจุด
(ที่มา: Review of Particle Physics [27])

นอกจากนี้ การกระจัดปลายทางที่เบี่ยงเบนไปจากแนวทางเดินอนุภาคเริ่มต้น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$y_{\text{plane}} = \frac{1}{\sqrt{12}} z_1 \, x \, \theta_{\text{plane}} + \frac{1}{2} z_2 \, x \, \theta_{\text{plane}} \tag{6.29}$$

โดยที่ z_1 และ z_2 คือ ฟังก์ชั่นแบบสุ่มเกาส์

6.9 การหาค่างบประมาณวัสดุ (X/X_0)

การเปลี่ยนทิศทางของอนุภาคที่มีประจุ เกิดขึ้นจากการชนของนิวเคลียส ในมุมเบี่ยงเบนเล็ก ๆ การเบี่ยงเบนทิศทางของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในวัสดุที่มีความหนา L สามารถหาได้จากความยาวรังสี (X_0) ซึ่งจะแสดงถึงพฤติกรรมของอนุภาคที่มีปฏิสัมพันธ์ในเนื้อของวัสดุ สำหรับสเตฟต้นแบบ สามารถประมาณค่างบประมาณวัสดุได้จากความยาวรังสีของวัสดุของสเตฟ ค่างบประมาณวัสดุจะขึ้นอยู่กับความหนา (X/X_0) และเปอร์เซ็นต์ของพื้นผิวที่ครอบคลุม (X/X_0 (%)) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$X/X_0 = \frac{\text{thickness}}{\text{radiation} \quad \text{length}}, \tag{6.30}$$

$$X/X_0(\%) = \frac{\text{thickness}}{\text{radiation} \quad \text{length}} \times \text{surface}(\%). \tag{6.31}$$

บทที่ 7
การวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุของสเตฟสำหรับติดตั้งในระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นใน

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการจำลองแบบสเตฟสำหรับติดตั้งในชั้นตรวจวัดชั้นในและชั้นตรวจวัดชั้นนอกของระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในสุด รวมถึงการวิเคราะห์เพื่อหาค่างบประมาณวัสดุโดยใช้โปรแกรม AliRoot

7.1 การสร้างแบบจำลองสเตฟเพื่อคำนวณค่างบประมาณวัสดุ

ค่างบประมาณวัสดุของสเตฟต้นแบบซึ่งขึ้นกับความหนาของวัสดุ (X/X_0) หรือเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุม ($X/X_0(\%)$) [33] จะถูกคำนวณด้วยโปรแกรม AliRoot โดยการสร้างอนุภาคเสมือนขึ้นมาเรียกว่า “geantinos” พวกมันจะถูกยิงตรงไปยังแบบจำลองสเตฟ และเนื่องจากมันเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่เกิดการเบี่ยงเบนหรือการสูญเสียพลังงานใด ๆ และจะถูกติดตามเช่นเดียวกับอนุภาคที่มีประจุในทุกขั้นตอน นักวิจัยสามารถจำกัดขอบเขตของสเตฟที่ต้องการให้อนุภาคเสมือนนี้พุ่งผ่านได้ โดยการตั้งค่ารัศมีต่ำสุด R_{min} และรัศมีสูงสุด R_{max} ค่าต่ำสุดและสูงสุดของมุมตกกระทบ ϕ และช่วงของระยะทางตามแนวแกน Z จาก $-Z_{\text{min}}$ ถึง $+Z_{\text{max}}$ ค่างบประมาณวัสดุสามารถวัดได้สองวิธี คือ วิธีแรก อนุภาคเสมือนจะถูกสร้างขึ้นในแนวตั้งฉากกับแกนตามยาวของสเตฟและจะถูกเจาะจงให้เคลื่อนที่ผ่านสเตฟเพื่อคำนวณค่างบประมาณวัสดุ ส่วนวิธีที่สองนั้น อนุภาคเสมือนจะถูกยิงออกจากจุดที่เกิดการชนเสมือน จากนั้นจะปล่อยให้อนุภาคเดินทางอย่างอิสระแล้วทำการวัดค่างบประมาณวัสดุที่ได้ซึ่งเป็นการเลียนแบบเหตุการจริงในการทดลองของหัววัดอลิซ

เพื่อให้ได้ค่างบประมาณวัสดุที่ต่ำลงคือ 0.3% สำหรับสเตฟที่จะใช้ติดตั้งในชั้นตรวจวัดชั้นใน องค์ประกอบต่าง ๆ และคุณสมบัติของชิ้นส่วนจะถูกป้อนให้กับซอฟท์แวร์จำลองแบบ (AliRoot) โดยรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆของสเตฟนั้น แสดงดังตารางที่ 7.1 และ 7.2

7.2 ผลการวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุของสเตฟสำหรับชั้นตรวจวัดชั้นใน

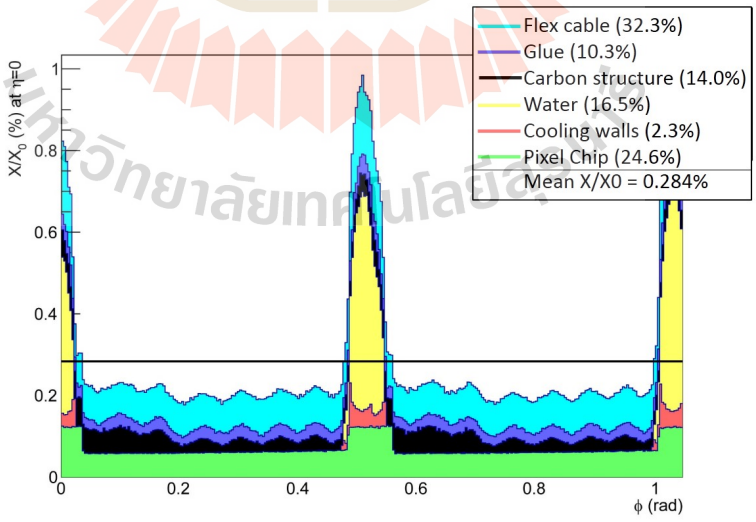
ผลการวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุของแบบจำลองของสเตฟสำหรับติดตั้งในระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในสุดของโมเดลต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 7.1 ถึง 7.5 แต่ละรูปแสดงการกระจายตัวของค่างบประมาณวัสดุของสเตฟสองชิ้นที่อยู่ชิดกันซึ่งขึ้นกับกับความกว้างของสเตฟ (ตามแนวแกน x) และค่างบประมาณวัสดุเฉลี่ยที่คำนวณต่อสเตฟ โดยยอดแหลมในแผนภาพเกิดขึ้นจากการทับซ้อนที่ขอบของสเตฟที่อยู่ชิดกันซึ่งเป็นส่วนของโครงสร้างที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์ ในขณะที่ยอดที่ต่ำลงมาประมาณ 0.5% X_0 คือผลจากท่อระบายความร้อน polyimide ที่ใช้น้ำเป็นสารนำความร้อนในโมเดล 2.1 และ 2.2 โดย

ตารางที่ 7.1 ตารางแสดงความหนาขององค์ประกอบของสเตฟที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยซอฟท์แวร์ AliRoot จำนวนในวงเล็บแสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในรายงานการออกแบบกรอบแนวคิดของ ALICE ITS [2]

วัสดุ	โมเดล 0	โมเดล 1	โมเดล 2.1	โมเดล 2.2	โมเดล 3	โมเดล 4
			ความหนา [μm]			
ส่วนโครงสร้าง						
Top CFRP M60J 3K	70 (70)	200 (120)	200 (100)	200 (100)	200 (120)	200 (100)
Bottom CFRP M60J 3K	70 (-)	200 (240)	-	-	200 (240)	-
ส่วนระบายความร้อน						
Pipe Kapton	70 (70)	-	130 (70)	130 (70)	-	130 (70)
water	1450 (1450)	-	1450 (1450)	940 (940)	-	940 (940)
Carbon plate	-	-	140 (140)	140 (140)	-	140 (140)
ส่วนเซนเซอร์						
Glue	125 (200)	250 (200)	100 (200)	100 (200)	250 (200)	100 (200)
Silicon chip			50 (50)			
Flex cable			100 (-)			
Polyimide Microchannel	-	100 (100)	-	-	-	-
Silicon Microchannel	-	-	-	-	40 (40)	-
water	-	200 (200)	-	-	160 (160)	-

(ที่มา: Conceptual Design Report for the Upgrade of the ALICE ITS)

ส่วนประกอบของสเตฟที่ส่งผลต่อค่างบประมาณวัสดุมากที่สุดคือส่วนที่เป็นสายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (flex cable)



รูปที่ 7.1 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 0

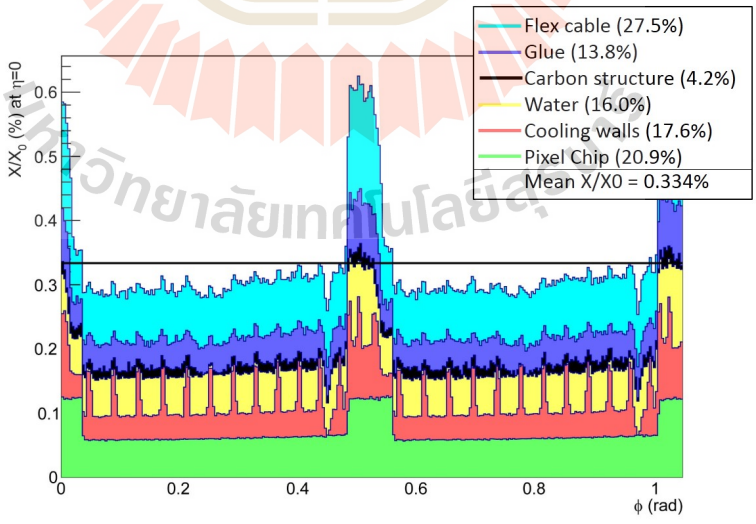
(ที่มา: Stave module design and development of the new Inner Tracking System [19])

ผลการวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุได้ถูกคำนวณในรูปค่าเฉลี่ยของการกระจายตัว ค่าสูงสุดในแต่ละแผนภาพแสดงถึงการทับซ้อนกันของขอบด้านข้างของสเตฟที่อยู่ชิดกัน ในโมเดล 2 ตำแหน่งของท่อ

ตารางที่ 7.2 ตารางแสดงความยาวรังสีขององค์ประกอบต่าง ๆ ของสเตฟที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยซอฟท์แวร์ AliRoot จำนวนในวงเล็บแสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในรายงานการออกแบบกรอบแนวคิดของ ALICE ITS [2, 34]

วัสดุ	โมเดล 0	โมเดล 1	โมเดล 2.1	โมเดล 2.2	โมเดล 3	โมเดล 4
			X_0 [cm]			
ส่วนโครงสร้าง						
Top CFRP M60J 3K			19 (25)			
Bottom CFRP M60J 3K	19 (25)	19 (25)	-	-	19 (25)	-
ส่วนระบายความร้อน						
Pipe Kapton	28.4 (28.6)	-	28.4 (28.6)	28.4 (28.6)	-	28.4 (28.6)
water	35.8 (36.1)	-	35.8 (36.1)	35.8 (36.1)	-	35.8 (36.1)
Amec Thermasol FGS 003	-	-	27 (25)	27 (25)	-	27 (25)
C Fleece	-	-	106 (25)	106 (25)	-	106 (25)
ส่วนเซนเซอร์						
Glue			44.37 (44.4)			
Silicon chip			9.35 (9.36)			
Flex cable			13.3 (13.3)			
Polyimide Microchannel	-	28.4 (28.6)	-	-	-	-
Silicon Microchannel	-	-	-	-	9.35 (9.36)	-
water	-	35.8 (36.1)	-	-	35.8 (36.1)	-
K13D2U 2K	-	-	26 (25)	26 (25)	-	26 (25)
C Fleece	-	-	106 (25)	106 (25)	-	106 (25)

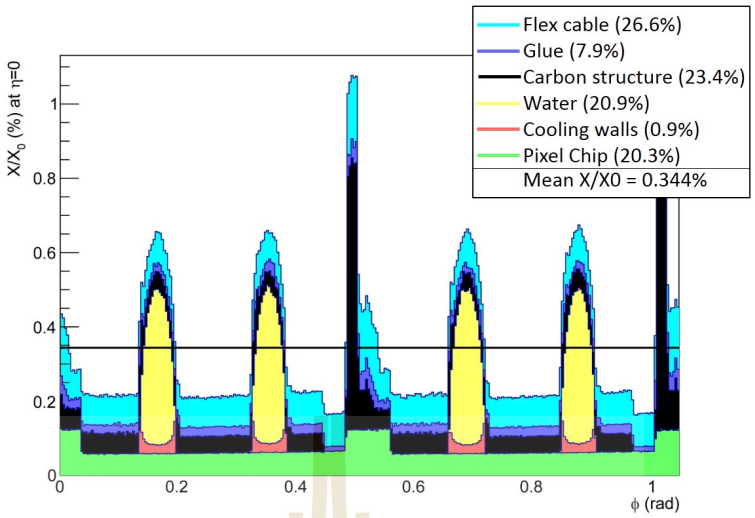
(ที่มา: Conceptual Design Report for the Upgrade of the ALICE ITS)



รูปที่ 7.2 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 1

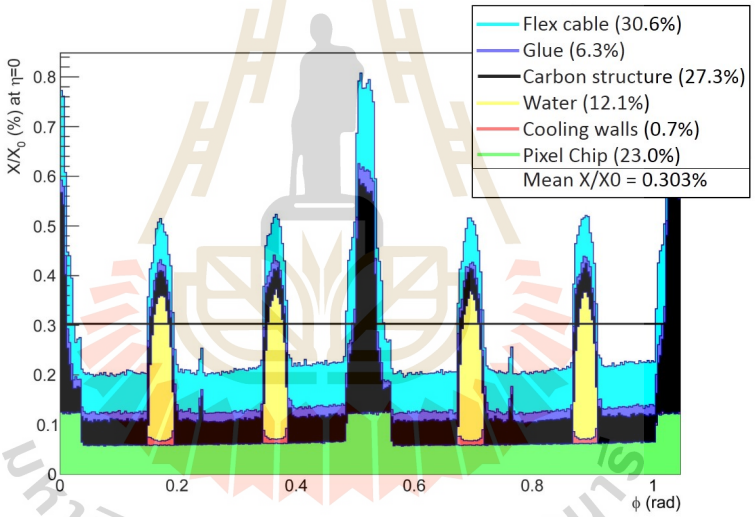
(ที่มา: Stave module design and development of the new Inner Tracking System [19])

ระบายความร้อนที่จัดวางใกล้แนวแกนกลางของฐานสเตฟนั้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำพาความร้อนได้ดีแม้ว่าจะทำให้มีค่างบประมาณวัสดุรวมสูงกว่าโมเดล 0 ก็ตาม โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.5% X_0



รูปที่ 7.3 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 21

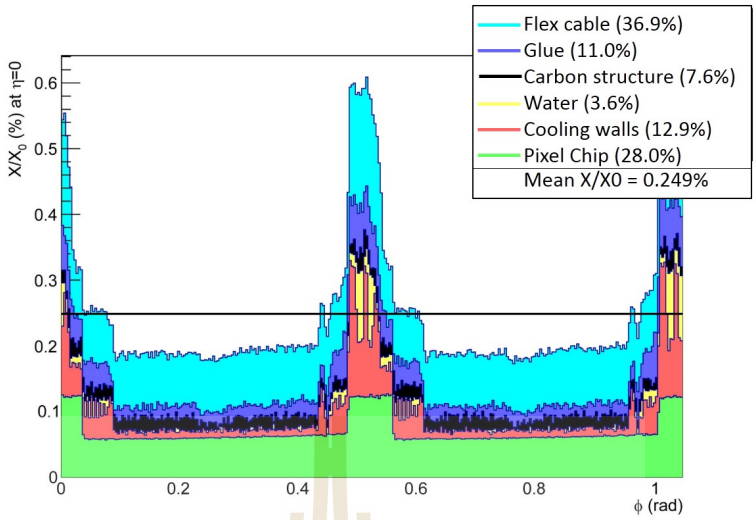
(ที่มา: Stave module design and development of the new Inner Tracking System [19])



รูปที่ 7.4 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 22

(ที่มา: Stave module design and development of the new Inner Tracking System [19])

ซึ่งรองจากค่างบประมาณวัสดุที่เกิดจากการซ้อนทับกันของขอบสเตฟดังรูปที่ 7.3 และ 7.4 สำหรับเทคโนโลยีระบายความร้อนด้วยไมโครแชนแนลที่ทำจากโพลีไอไมด์โดยมีน้ำเป็นสารหล่อเย็นในโมเดลที่ 1 และที่ทำจากซิลิกอนโดยมีฟลีออนเป็นสารหล่อเย็นในโมเดลที่ 3 นั้น แสดงให้เห็นเห็นถึงประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้ดีที่สุดและยังคงให้ค่างบประมาณวัสดุที่ต่ำที่สุดด้วย [16] ผลการคำนวณทั้งหมดของแต่ละโมเดลแสดงให้เห็นว่าค่างบประมาณวัสดุของสเตฟที่ได้รับการออกแบบไว้นั้นให้ผลลัพธ์ที่ดีและสอดคล้องกับค่าที่ได้คาดการณ์ไว้ ดังสรุปในตารางที่ 7.3

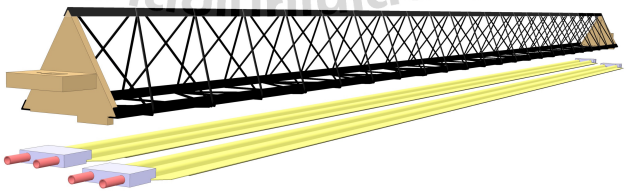


รูปที่ 7.5 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุของสเตฟโมเดล 3

(ที่มา: Stave module design and development of the new Inner Tracking System [19])

7.3 ผลการวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุของสเตฟสำหรับชั้นตรวจวัดชั้นนอก

ในการออกแบบสเตฟสำหรับติดตั้งในชั้นตรวจวัดชั้นนอก ยังคงใช้แนวความคิดในการออกแบบเช่นเดียวกับสเตฟสำหรับชั้นตรวจวัดชั้นใน แต่ได้มีการปรับปรุงรายละเอียดในส่วนของฐานของสเตฟ โดยมีการแบ่งครึ่งตามแนวยาวในลักษณะของสเตฟแบบคู่ ดังแสดงในรูป 7.6 โดยในแต่ละครึ่งนั้นจะประกอบด้วยเซนเซอร์ชิปจำนวนเจ็ดชิ้น ท่อระบายความร้อนและแผ่นนำความร้อน โดยท่อระบายความร้อนทั้งสองท่อนั้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 2.67 มม. ซึ่งมีน้ำเป็นสารหล่อเย็นอยู่ด้านใน



รูปที่ 7.6 แผนภาพแสดงของโครงสร้างรองรับและระบบระบายความร้อนของสเตฟสำหรับติดตั้งในชั้นตรวจวัดชั้นนอก [10]

(ที่มา: Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System)

สเตฟสำหรับติดตั้งในชั้นตรวจวัดชั้นนอกได้รับการออกแบบมาเพื่อให้มีความแข็งแรงคงทนและประสิทธิภาพที่ดีในการระบายความร้อนเช่นเดียวกันกับสเตฟสำหรับติดตั้งในชั้นตรวจวัดชั้นใน ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคล้ายคลึงกันแต่จะมีเซนเซอร์ชิปเพียงเจ็ดตัวต่อครึ่งสเตฟ รายละเอียดคุณสมบัติของ

ตาราง ที่ 7.3 งบ ประมาณ วัสดุ โดย รวม ที่ ได้ จาก การ จำลอง แบบ ด้วย โปรแกรม AliRoot สำหรับสเตฟต้นแบบแต่ละโมเดล เปรียบเทียบกับการคำนวณในทางทฤษฎีที่ได้มีการระบุไว้ในรายงานการออกแบบกรอบแนวคิดของ ALICE ITS [2] ผลการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากรายละเอียดโครงสร้างทั้งหมดของสเตฟแสดงให้เห็นว่า โมเดล 2.2 มีความเหมาะสมที่สุดในแง่ของการลดค่างบประมาณวัสดุและแง่ของการผลิต

สเตฟต้นแบบ	X/X_0 [ค่าคาดการณ์ใน CDR] (%)	X/X_0 [ผลการวิเคราะห์ด้วย AliRoot] (%)
โมเดล 0	0.26	0.284
โมเดล 1	0.30	0.334
โมเดล		
2.1	0.31	0.344
2.2	0.30	0.303
โมเดล 3	0.25	0.249

ส่วนประกอบต่าง ๆ ในการประกอบสเตฟสำหรับการจำลองแบบเพื่อคำนวณค่างบประมาณวัสดุแสดงไว้ดังตารางที่ 7.4

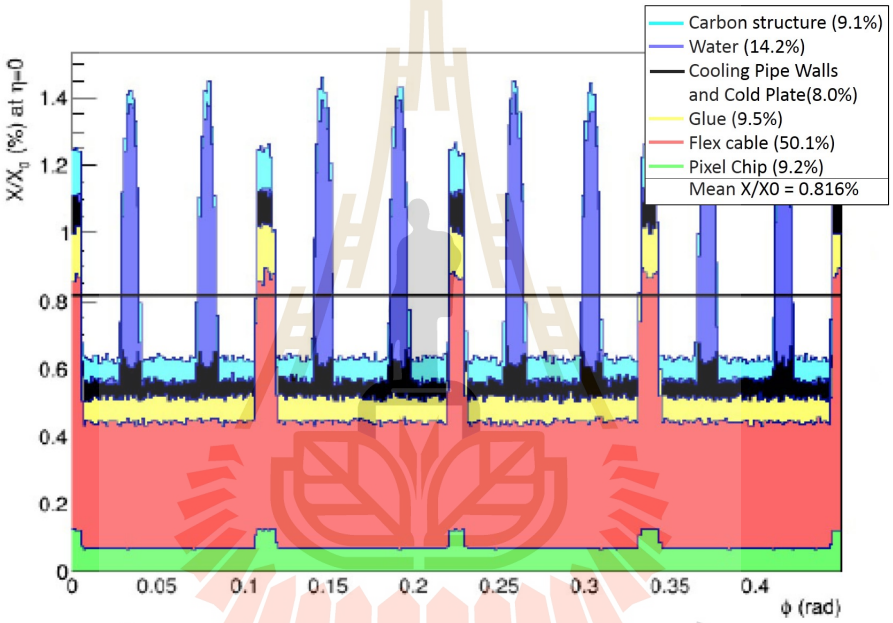
ผลที่ได้จากการจำลองแบบการกระจายตัวของค่างบประมาณวัสดุของสเตฟแสดงดังรูปที่ 7.7 ยอดแหลมประมาณ 1.25 %X_0 ในแผนภาพเป็นผลมาจากขอบของสเตฟแต่ละครึ่งที่ถูกติดตั้งไว้โดยรอบ ส่วนยอดที่สูงที่สุดเป็นผลของท่อระบายความร้อนที่ทำจากโพลีไอไมด์บรรจุน้ำทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็น จากผลการวิเคราะห์ สามารถคำรวณค่างบประมาณวัสดุโดยรวมได้ 0.8 % ซึ่งเป็นไปตามค่าที่ได้คาดการณ์ไว้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 7.4 ตารางแสดงความหนาขององค์ประกอบของสเตฟที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยซอฟท์แวร์ AliRoot รวมถึงค่าคาดการณ์ของงบประมาณวัสดุ [10]

องค์ประกอบหลักของสเตฟ	องค์ประกอบ	วัสดุ	ความหนา [μm]	X/X_0 [cm]	X/X_0 [%]
Module	FPC Metal layers	Aluminium	50	8.896	0.056
	FPC Insulating layers	Polyimide	100	28.41	0.035
	FPC Insulating layers	Polyimide	100	28.41	0.035
	Module plate	Carbon fibre	120	26.08	0.046
	Pixel Chip	Silicon	50	9.369	0.053
	Glue	Eccobond 45	100	44.37	0.023
Power Bus	Metal layers	Aluminium	200	8.896	0.225
	Insulating layers	Polyimide	200	28.41	0.070
	Glue	Eccobond 45	100	44.37	0.023
Cold Plate		Carbon fleece	40	106.80	0.004
		Carbon paper	30	26.56	0.011
	Cooling tube wall	Polyimide	64	28.41	0.013
	Cooling fluid	water		35.76	0.105
	Carbon plate	Carbon fibre	120	26.08	0.046
	Glue	Eccobond 45	100	44.37	0.023
Space Frame		Carbon rowing			0.080
รวม					**0.813**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 7.7 แผนภาพการกระจายตัวค่างบประมาณวัสดุของต้นแบบสเตฟสำหรับติดตั้งในชั้นตรวจวัดชั้นนอก ยอดที่สูงที่สุดในแผนภาพแสดงค่างบประมาณวัสดุของท่อระบายความร้อนโพลีไอไมด์ที่บรรจุน้ำ [10]

(ที่มา: Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System)

บทที่ 8
การวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

เนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงหลักการคำนวณค่างบประมาณวัสดุที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม AliRoot การปรับปรุงและตรวจสอบชุดคำสั่งที่ใช้สำหรับคำนวณในส่วนของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง รวมถึงผลลัพธ์จากการคำนวณ

8.1 การเตรียมข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลอง

หลักการในการคำนวณค่างบประมาณวัสดุเริ่มต้นจากการจำลองอนุภาคแบบสุ่มขึ้นมาจำนวนหนึ่ง เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางของหัววัด โดยในแต่ละเส้นทางของอนุภาคที่วิ่งผ่าน (track) ค่างบประมาณวัสดุของแต่ละสสารจะถูกคำนวณและรวบรวมไว้เพื่อแสดงผลเป็นหมวดหมู่การแสดงผล (scenarios) ตามที่ต้องการ ซึ่งในงานนี้ประกอบด้วยหกหมวดหมู่ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ตารางแสดงหมวดการแสดงผลของการคำนวณค่างบประมาณวัสดุ

ระดับ	หมวด	รายละเอียด
1	PCB	แผ่นวงจรพิมพ์
2	COPPER	ทองแดง
3	PIPE	ท่อหล่อเย็น
4	PLATE	แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน
5	PASSIVE	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
6	SHIELD	ลวดเหนี่ยวนำและอุปกรณ์ รวมทั้งกล่องครอบในตัวแปลงกระแสตรง

กระบวนการคำนวณเริ่มต้นด้วยการนำเอาชุดคำสั่งเดิมที่ใช้กับสเตฟมาปรับปรุงใหม่ แล้วทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมก่อนนำไปใช้งานกับแบบจำลองของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง กระบวนการคำนวณชุดคำสั่งเดิมที่ใช้คำนวณค่างบประมาณวัสดุกับสเตฟ สรุปได้ดังนี้

1. ที่ตั้งแฟ้มงานคือ “`/AliRoot/ITSMFT/ITS/itsTestBench/MaterialBudget/`”
2. ทำการแก้ไขชุดคำสั่งในแฟ้ม “`AliITSUv2.cxx`” และ “`AliITSUv2Layer.cxx`”
3. ทำการปรับปรุงระบบโดยใช้คำสั่ง “`aliBuild ..`”
4. ทำการคำนวณโดยใช้ชุดคำสั่ง “`RunMatBud.sh`”
5. ทำการแสดงผลลัพธ์โดยใช้ชุดคำสั่ง “`MakeMatBudPlot.C`”
   (ชุดคำสั่ง “`GetMaterialBudget.C`” จะถูกเรียกใช้ในขั้นตอนนี้)

6. ผลลัพธ์จะบันทึกลงในแฟ้มที่ชื่อ “Material-details.pdf”.

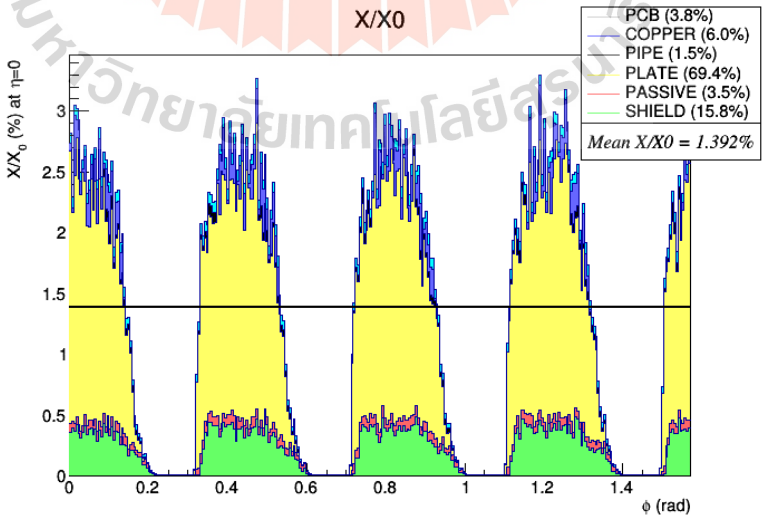
8.2 การคำนวณชุดคำสั่งที่ถูกปรับปรุงใหม่สำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

สำหรับการคำนวณค่างบประมาณวัสดุสำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ชุดคำสั่งเดิมจะถูกแก้ไขใหม่โดยมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณให้สอดคล้องกับที่ตั้งของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง โดยชุดคำสั่งที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่นี้ คือ “MakeMatPlot.C” และ “DrawMatPlot.C” รวมถึง “RunMatPlot.C” สำหรับเรียกชุดคำสั่ง “GetMaterialBudget.C” แทนชุดคำสั่งเดิม โดยทำการแก้ไขชุดคำสั่งในแฟ้ม “AliITSUv2.cxx” และ “AliITSUv2Layer.cxx”

ชุดคำสั่งที่ถูกปรับปรุงใหม่สำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง ได้ถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยการนำไปใช้งานร่วมกับแบบจำลองทางเรขาคณิตของสเตฟ ภายใต้ตัวแปรเดิม ก่อนจะนำมาใช้งานกับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

8.3 ผลการวิเคราะห์ค่างบประมาณวัสดุ สำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุเทียบในแนวตัดขวาง (ระหว่างมุม 0 ถึง 90 องศา) ของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงในชั้นตรวจวัดชั้นนอกได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.1 ซึ่งพบว่าค่างบประมาณวัสดุเฉลี่ยที่คำนวณได้มีค่า 1.392 % โดยค่าการกระจายตัวของงบประมาณวัสดุสูงสุดคือ 69.4 % นั้น เป็นผลมาจากแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำด้วยอลูมิเนียม (PLATE)



รูปที่ 8.1 ผลการคำนวณค่างบประมาณวัสดุในแนวตัดขวางระหว่างมุม 0 ถึง 90 องศา ของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงในชั้นตรวจวัดชั้นนอก

(ที่มา: P. Namwongsa, 2017)

ค่างบประมาณวัสดุที่ได้มีค่าเฉลี่ยเป็นสองเท่าของค่าคาดการณ์ของชั้นตรวจวัดชั้นนอก (0.8 %) ซึ่งจะส่งผลให้การตรวจวัดอนุภาคที่มีค่าโมเมนตัมตามขวางต่ำทำได้ลดลง

บทที่ 9
สรุปผลและวิจารณ์

การปรับปรุงระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในของหัววัดอลิซ มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความละเอียดของพารามิเตอร์ผลกระทบและเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามทางเดินของอนุภาค เพื่อลดค่าความไม่แน่นอนทางสถิติสำหรับการกระเจิงของอนุภาคที่มีค่าโมเมนตัมตามขวางต่ำ การสร้างสเตฟต้นแบบและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบระบายความร้อนใหม่ จะช่วยลดค่างบประมาณวัสดุสำหรับระบบติดตามทางเดินอนุภาคใหม่นี้ได้ ผลจากการจำลองแบบด้วยซอฟท์แวร์ AliRoot แสดงให้เห็นว่าสำหรับระบบติดตามทางเดินอนุภาคชั้นในสุด การใช้โครงสร้างที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีน้ำหนักเบาร่วมกับท่อระบายความร้อนโพลีไอไมด์ สามารถลดค่างบประมาณวัสดุลงเหลือเพียง 0.3 %X_0 ต่อชั้นในโมเดล 2 การเพิ่มชั้นตรวจวัดขึ้นอีกหนึ่งชั้นและการใช้เทคโนโลยีของเซนเซอร์ชิปแบบ CMOS ที่มีขนาดของพิกเซลที่เล็กลง สามารถขยายรัศมีครอบคลุมการตรวจจับได้มากขึ้น ($|\eta|$) $\leq$ 1.22 นอกจากนี้ การเพิ่มจำนวนของชั้นตรวจวัดจะช่วยให้การตรวจจับมีความต่อเนื่องและครอบคลุมอนุภาคได้หลากหลายมากขึ้น ผลจากการจำลองยังช่วยยืนยันได้ว่ากรอบแนวคิดในการออกแบบระบบติดตามทางเดินอนุภาคของหัววัดอลิซใหม่นี้ จะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงหัววัดอลิซใหม่ต่อไป

สำหรับแบบจำลองทางเรขาคณิตของโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ตั้งอยู่บนโครงสร้างบริการของ ITS ที่ปรับปรุงใหม่ ได้ถูกจำลองแลลขึ้นมาด้วยโปรแกรม AliRoot โดยอยู่ที่ตำแหน่งวงล้อขอบ โมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเหล่านี้จะยื่นเข้าไปในบริเวณที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจวัดของชั้นตรวจวัดชั้นนอกซึ่งจะทำให้ความสามารถในการตรวจวัดอนุภาคที่มีโมเมนตัมตามขวางต่ำลดลง เนื่องจากทำให้มีค่างบประมาณวัสดุสูงขึ้น

แบบจำลองทางเรขาคณิตถูกสร้างและติดตั้งในโปรแกรม AliRoot ที่เซิร์น โดยได้ผ่านการตรวจสอบว่าไม่มีการซ้อนทับกันของชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผลการคำนวณค่างบวัสดุเฉลี่ยสำหรับโมดูลแปลงไฟฟ้ากระแสตรงในชั้นตรวจวัดชั้นนอกมีค่าเท่ากับ 1.392 % โดยองค์ประกอบหลักเป็นแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำด้วยอลูมิเนียมถึง 69.4 %

ค่างบประมาณวัสดุเฉลี่ยที่คำนวณได้มีค่าเป็นสองเท่าของค่าที่ค่าการณ์ไว้ชั้นตรวจวัดชั้นนอก ด้วยผลลัพธ์ดังกล่าว ทำให้แบบจำลองทางเลือกนี้ถูกถอดออกจากการพิจารณา ซึ่งถ้าหากยังต้องการใช้แบบจำลองนี้อยู่ จำเป็นจะต้องหาทางลดความหนาของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนลง หรือเปลี่ยนไปใช้วัสดุชนิดอื่นที่ทำให้ค่างบประมาณวัสดุลดลง

ท้ายที่สุดแล้ว โมเดล 2 ได้ถูกเลือกใช้เป็นสเตฟต้นแบบในการผลิตสำหรับติดตั้งในระบบติดตามทางเดินอนุภาคในขั้นตอนสุดท้ายของการปรับปรุง แม้ว่าค่างบประมาณวัสดุของโมเดลที่ 2 นี้จะไม่ได้มีค่าต่ำที่สุด แต่ก็มีความเหมาะสมในด้านการผลิต เช่น ต้นทุนการผลิตและค่าการนำความร้อนที่ดีกว่าโมเดล 0 ส่วนโมเดลที่ 3 ซึ่งเป็นโมเดลที่ทำการปรับปรุงมาจากโมเดลที่ 1 โดยมีความพยายามจะลดขนาดของไมโครแชนนอลที่ทำจากโพลีไอไมด์ลง แต่ผลจากขนาดของไมโครแชนแนลที่บางลง อาจเพิ่มโอกาสในการรั่วไหลของสารทำความเย็นได้ ทำให้ทีมออกแบบเสนอที่จะเปลี่ยนมาใช้ซิลิคอนแทน อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ซิลิกอนยังคงนำไปสู่ปัญหาอื่น ๆ ที่ตามมา เช่น ปัญหาทางด้านเทคนิกในการผลิต ต้นทุนการผลิต

ที่มีราคาสูง ดังนั้น รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างสเตฟ จึงเป็นโมเดล 2.2 ที่ได้รับการปรับปรุงแก้ไขอีกครั้งจนกลายมาเป็นโมเดลที่ 4 ซึ่งจะได้เข้าสู่กระบวนการทดสอบโครงสร้างและการติดตั้งต่อไป

บรรณานุกรม

[1] L. Evans, EPFL Press (2009)

[2] ALICE collaboration, LHCC-2012-005 (2012) [LHCC-G-159]

[3] K. Nakamura et al., Review of Particle Properties, J. Phys. 37 (2010) 075021

[4] M. Havr*á*nek et al., Journal of Instrumentation 10 (2015) 02013

[5] E. Corrin, EUDET-Memo 01 (2010)

[6] A. Bulgheroni, EUDET-Memo 48 (2008)

[7] I. Rubinskiy, EUDET-Memo 12 (2010)

[8] A. Mastroserio et al., ALICE Internal Note 01 (2012) 109

[9] M. Sitta, Proceedings, 22nd International Workshop on Vertex Detectors (Vertex 2013) 018

[10] ALICE collaboration, Journal of Physics G 41 (2014) 087002

[11] S. Senyukov, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A732 (2013) 164-167

[12] S. Torbjorn et al., Journal of High Energy Physics 05 (2006) 026

[13] M. Gyulassy et al., Computer Physics Communications 83 (1994) 307-331

[14] K. Aamodt, et al., Journal of Instrumentation 3 (2008) S08002

[15] R. Lemmon, Nuclear Physics A 904 (2013) 937C

[16] S. Rossegger, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 731 (2013) 40

[17] P. Cortese et al., CERN Document Server (2005) CERNLHCC(2005-018)

[18] J. Adam et al., CERN Document Server (2015) CERN-LHCC(2015-006).

[19] W. Poonsawat et al., Journal of Instrumentation 14 (2019) P05003–P05003

[20] I. Belikov, EPJ Web of Conferences 70 (2014) 29

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[21] http:// project-dcdc.web.cern.ch/ project-dcdc/ public/ Documents/ FEAST2CLP_Datasheet.pdf

[22] http://alice-offline.web.cern.ch/AliRoot/Manual.html

[23] https://github.com/alisw/AliRoot

[24] Y.-S. Tsai, Review of Modern Physics 46 (1974) 815-851

[25] H. Davies, et al., Physical Review 93 (1954) 788-795

[26] W.-M. Yao, Journal of Physics G 33 (2006) 1

[27] C. Patrignani, Chinese Physics C 40 (2016) 100001

[28] R. M. Sternheimer, Physical Review 88 (1952) 851-859

[29] W. H. Barkas, Physical Review 101 (1956) 778-795

[30] J. F. Ziegler, Radiation Research 152 (1999) 219-222

[31] J. D. Jackson, Physical Review D 59 (1998) 017301

[32] H. A. Bethe, Physical Review 89 (1953) 1256-1266

[33] S. Tavernier, Springer Berlin Heidelberg (2010)

[34] M. Tanabashi et al., Physical Review D 98 (2018) 030001

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี