สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ 3

รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย 5

บทคัดย่อ 7

Abstract 9

1 บทนำ 23

2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 29

3 ระเบียบวิธีวิจัย 35

3.1 การไหลรวมของK^+ ในพลศาสตร์โควาเรียนต์เคออน 35

3.2 การกระจายอะซิมุททอล ของ K^+ เพื่อศึกษาผลของตัวกลางจากการชนของไอออนหนัก 36

3.3 ภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ 36

3.4 สเปกตรัมตามขวางของการเกิดอนุภาค K^+ 37

3.5 การเกิดอนุภาค σ 37

3.6 ศึกษาพลศาสตร์ของอนุภาค Ξ^-, $\bar{\Xi}^+$ และ K^+K^+ เพื่อหาทริกเกอร์ที่เหมาะสมของปฏิกิริยา 37

4 ผลการวิจัย 39

4.1 การไหลรวมของ K^+ ในพลศาสตร์โควาเรียนต์เคออน 39

4.2 ผลการคำนวณการกระจายอะซิมุททอลของ K^+ 42

4.3 ภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ 44

4.4 สเปกตรัมตามขวางของการเกิดอนุภาค K^+ 54
4.5 ผลการศึกษาการเกิดอนุภาค σ เมซอน 57
4.6 การศึกษาเงื่อนไขของปฏิกิริยาระหว่าง $\bar{\Xi}^+$ หรือ K^+K^+ 59
4.7 กลไกการหน่วง Ξ^- 60

5 อภิปรายและวิจารณ์ผล 65
5.1 การไหลรวมของ K^+ ในพลศาสตร์โควาเรียนต์เคออน 65
5.2 การคำนวณการกระจายอะซิมุททอล ของ K^+ 66
5.3 ภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ 66
5.4 สเปกตรัมตามขวางของการเกิด K^+ 67
5.5 ผลการศึกษาการเกิดอนุภาค σ เมซอน 68
5.6 การศึกษาเงื่อนไขของปฏิกิริยาระหว่าง $\bar{\Xi}^+$ หรือ K^+K^+ 68

6 สรุปผลวิจัย 71
6.1 การไหลรวมของ K^+ในพลศาสตร์โควาเรียนต์เคออน 71
6.2 การกระจายอะซิมุททอลของ K^+ 71
6.3 ภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ 72
6.4 สเปกตรัมมวลตามขวางของการเกิดอนุภาค K^+ 73
6.5 การเกิด σ เมซอน 73
6.6 การศึกษาเงื่อนไขของปฏิกิริยาระหว่าง Ξ และ K^+K^+ 74

ภาคผนวก 75

A อภิธานศัพท์ และ คำสำคัญ 77

B การศึกษาพลศาสตร์ของการสร้างอนุภาคแปลกในการชนของไอออนหนัก 83
B.1 พลศาสตร์โควาเรียนต์ของอนุภาคเคออน 85
B.2 การไหลรวมอนุภาค K^+ ภายใต้พลศาสตร์โควาเรียนต์เคออน จากการชนของ $^{58}Ni +^{58} Ni$ที่พลังงาน 1.93 A GeV โดยใช้แบบจำลอง QMD . 88

C แบบจำลองพลศาสตร์ควอนตัมเชิงโมเลกุล 89

D คู่มือการใช้ชุดโปรแกรมแบบจำลอง UrQMD 103
D.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจาก output file ของโปรแกรมแบบจำลอง UrQMD 107

D.2 การสร้างภาพเคลื่อนไหวจาก output file ของโปรแกรมแบบจำลอง UrQMD 115

บรรณานุกรม **125**

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ **131**

บทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการส่งตีพิมพ์ **133**

สารบัญรูป

1.1 มุมมองด้านบนของ Kaon Spectrometer (KaoS) ประกอบด้วยหัววัดหลายชนิด ที่มา [14] 26

2.1 มวลของK^+มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับความหนาแน่นนิวคลีออน (ρ_0 หมายถึงความหนาแน่นอิ่มตัว) วงกลมแสดงผล kaon-nucleon scattering amplitude ในสุญญากาศ ขณะที่สี่เหลี่ยมสอดคล้องกับผลของ self-consisent [20] 31

2.2 ฟังก์ชันสเปกตรัมK^+ สำหรับโมเมนตัมที่แตกต่างกัน: 0 (เส้นทึบ), 200 MeV (เส้นจุด), 400 MeV (เส้นประ) และ 600 MeV (เส้น ประ-จุด-จุด) เส้นสีดำแสดงผลที่ $\rho = \rho_0$เส้นสีเทาแสดงผลที่ $\rho = 2\rho_0$ [20] 31

2.3 ปฏิกิริยาและขั้นตอนการเกิดไฮเปอร์นิวเคลียส 34

4.1 การคำนวณผลของการไหลเชิงตรงของอนุภาค K^+ เทียบกับฟังก์ชัน normalize rapidity จากการชนของ$^{58}_{28}Ni +^{58}_{28} Ni$ ที่พลังงาน 1.93 AGeV โดยใช้แบบจำลอง QMD วงกลมทึบ แสดงผลการทดลองK^+ 03 [65] เทียบกับผลการคำนวณ hard EOS (เส้นประ) และ soft EOS (เส้นทึบ) 39

4.2 การคำนวณผลของการไหลเชิงวงรี ของอนุภาค K^+ เทียบกับฟังก์ชัน normalize rapidity จากการชนของ$^{58}_{28}Ni +^{58}_{28} Ni$ ที่พลังงาน 1.93 A GeV โดยใช้แบบจำลอง QMD สัญลักษณ์วงกลม(ทึบ) ผลการทดลองจาก (03 data) และ KaoS data [65] เทียบกับผลการคำนวณ Soft EOS (เส้นทึบ) และ hard EOS (เส้นประ) 40

4.3 ดิฟเฟอเรนเชียลของการไหลเชิงตรง ของ K^+ ในช่วงแรพิดิตี้ จากการชนของ $^{58}Ni +^{58} Ni$ ที่พลังงาน 1.93 A GeV พารามิเตอร์กระทบ 1.7 fm. เทียบกับผลการทลอง [66] 41

4.4 การกระจายแรพิดิตี้ของ K^+ จากการชน $^{58}_{28}Ni+^{58}_{28}Ni$ ที่พลังงาน 1.93 A GeV โดยใช้พารามิเตอร์กระทบ 2.0 fm โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง [67] 41

4.5 การกระจายอะซิมุททอล ของ K^+ ของอันตรกิริยาการชนของ $^{58}_{28}Ni+^{58}_{28}Ni$ ที่ ระดับพลังงาน 1.93 A GeV ค่าพารามิเตอร์กระทบ $3.8 < b < 6.5$ fm แรพพิดดิที $0.3 < y/y_{beam} < 0.7$ และ โมเมนตัมส่งผ่าน $0.2 < p_t < 0.8$ GeV/c สัญลักษณ์วงกลมทึบเป็นผลการทดลอง [65] เส้นทึบเป็นผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง QMD 42

4.6 การกระจายอะซิมุททอล ของ K^+ของอันตรกิริยาการชนของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่ ระดับพลังงาน 1.93 A GeV ค่าพารามิเตอร์กระทบ $3.8 < b < 6.5$ fm แรพพิดดิที $0.3 < y/y_{beam} < 0.7$ และ โมเมนตัมส่งผ่าน $0.2 < p_t < 0.8$ GeV/c สัญลักษณ์วงกลมทึบเป็นผลการทดลอง [65] เส้นทึบเป็นผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง QMD 44

4.7 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 32 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 45

4.8 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 40 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 45

4.9 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 48 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 46

4.10 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 60 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 47

4.11 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{197}_{79}Au +^{197}_{79} Au$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 72 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 48

4.12 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{58}_{28}Ni+^{58}_{28}Ni$ ที่พลังงาน 1.93 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 32 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 48

4.13 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{58}_{28}Ni+^{58}_{28}Ni$ ที่พลังงาน 1.93 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 40 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 49

4.14 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{58}_{28}Ni+^{58}_{28}Ni$ ที่พลังงาน 1.93 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 32 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 50

4.15 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{58}_{28}Ni+^{58}_{28}Ni$ ที่พลังงาน 1.93 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 60 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 50

4.16 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{12}_{6}C +^{12}_{6} C$ ที่พลังงาน 1.80 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 32 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 51

4.17 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{12}_{6}C +^{12}_{6} C$ ที่พลังงาน 1.80 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 40 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 52

4.18 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{12}_{6}C +^{12}_{6} C$ ที่พลังงาน 1.80 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 48 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 53

4.19 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับโมเมนตัมในกรอบปฏิบัติการ (p_{lab}) จากปฏิกิริยาการชนของ ${}^{12}_{6}C + {}^{12}_{6}C$ ที่พลังงาน 1.80 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว (polar angle;) 60 องศา เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS [14] 53

4.20 การคำนวณสเปกตรัมตามขวางของการเกิด K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ตามขวาง จากปฏิกิริยาการชนของ ${}^{58}_{28}Ni + {}^{58}_{28}Ni$ โดยใช้ soft EOS โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์กระทบ $b \leq 4.5$ fm ที่อยู่ในช่วงแรพิดิตี้ $-0.69 < y_{cm} < -0.54\,(\times 10^2)$, $-0.54 < y_{cm} < -0.39\,(\times 10^1)$ และ $-0.39 < y_{cm} < -0.24\,(\times 10^0)$ ตามลำดับจากบนลงล่าง 54

4.21 การคำนวณสเปกตรัมตามขวางของการเกิด K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ตามขวาง จากปฏิกิริยาการชนของ ${}^{58}_{28}Ni + {}^{58}_{28}Ni$ โดยใช้ hard EOS โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์กระทบ $b \leq 4.5$ fm ที่อยู่ในช่วงแรพิดิตี้ $-0.69 < y_{cm} < -0.54\,(\times 10^2)$, $-0.54 < y_{cm} < -0.39\,(\times 10^1)$ และ $-0.39 < y_{cm} < -0.24\,(\times 10^0)$ ตามลำดับจากบนลงล่าง 55

4.22 การคำนวณสเปกตรัมตามขวางของการเกิด K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ตามขวาง จากปฏิกิริยาการชนของ ${}^{58}_{28}Ni + {}^{58}_{28}Ni$ โดยใช้Soft EOSและแบบแข็ง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์กระทบ $b \leq 4.5$ fm ที่อยู่ในช่วงแรพิดิตี้ $-0.69 < y_{cm} < -0.54\,(\times 10^2)$, $-0.54 < y_{cm} < -0.39\,(\times 10^1)$ และ $-0.39 < y_{cm} < -0.24\,(\times 10^0)$ ตามลำดับจากบนลงล่าง 55

4.23 การแจกแจงแรพิดิตี้ ของการเกิด K^+ เทียบกับฟังก์ชันของ normalize rapidity จากการชนของ ${}^{58}_{28}Ni + {}^{58}_{28}Ni$ เมื่อเพิ่มการคำนวณค่าศักย์ของเคออน - นิวคลีออน (K^+N) โดยใช้ soft EOSและ hard EOS 56

4.24 ค่าภาคตัดขวางการเกิดซิกมาจากการชนของ $p + {}^{40}Ca$ ที่พลังงาน 1.5 A GeV เทียบกับ มวลของซิกมาซึ่งคงที่ 57

4.25 ค่าภาคตัดขวางการเกิดซิกมาจากการชนของ $p + {}^{208}Pb$ ที่พลังงาน 1.5 AGeV เทียบกับมวลที่แปรเปลี่ยนของซิกมา 58

4.26 อัตราส่วนของภาคตัดขวางของซิกมาเทียบกับมวลที่แปรเปลี่ยนของซิกมาของปฏิกิริยา $p + {}^{40}Ca$ และ $p + {}^{208}Pb$ 58

4.27 เปรียบเทียบมัลติพลิซิตีระหว่าง Ξ^-, $\bar{\Xi}^+$ และ K^+K^+ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา $\bar{p}$+Au ที่พลังงานศูนย์กลางมวล 3 ถึง 4 GeV 60

4.28 การแจกแจงโมเมนตัมของ K^+ (จากคู่ K^+K^+) ในปฏิกิริยา $\bar{p}$+Au ที่พลังงานศูนย์กลางมวล $\sqrt{s} = 4$ GeV 61
4.29 การแจกแจงจำนวนครั้งของการกระเจิง (number of scatterings: Nos) ของ Ξ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา $\bar{p}$+Au ที่พลังงานศูนย์กลางมวล $\sqrt{s} =$ 4 GeV 62
4.30 เปรียบเทียบการแจกแจงโมเมนตัมของ Ξ^- ที่เกิดจากปฏิกิริยา $\bar{p}+p$ และ $\bar{p}$+Au ที่พลังงานศูนย์กลางมวล $\sqrt{s} = 4$ GeV (พิจารณาในกรอบอ้างอิงห้องปฏิบัติการ) 63

C.1 สมการสถานะ แสดงถึงการขึ้นกับความหนาแน่นของพลังงานต่ออนุภาคในสสารนิวเคลียร์ ที่ อุณหภูมิ T = 0 สำหรับพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันสองชุด 96
C.2 แสดงภาคตัดขวางของปฏิกิริยา π^-p และ π^+p ที่โมเมนตัมค่าต่างๆ . . . 101

สารบัญตาราง

4.1 แสดงค่าการไหลเชิงตรง v_1 และ การไหลเชิงวงรี v_2 เปรียบเทียบผลการทดลอง [65]และผลการคำนวณโดยรวม และไม่รวมศักย์ K^+N จากการชนของ ^{58}Ni+^{58}Ni ที่ ระดับพลังงาน 1.93 A GeV 43

4.2 แสดงค่าการไหลเชิงตรง v_1 และ การไหลเชิงวงรี v_2 เปรียบเทียบผลการทดลอง [65] และผลการคำนวณโดยรวม และไม่รวมศักย์ K^+N จากการชนของ $^{197}_{79}Au$ +$^{197}_{79}Au$ ที่ ระดับพลังงาน 1.5 A GeV 43

C.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการที่ (C.20) สำหรับสมการสถานะทางนิวเคลียร์แบบแข็ง (hard EOS) และแบบอ่อน (soft EOS) 95

C.2 แสดงข้อมูลของ N^* ที่บรรจุในแบบจำลอง QMD โดยข้อมูลเหล่านี้ได้แก่ มวลของเรโซแนนซ์ค่าความกว้างรวมและความกว้างบางส่วนของการสลายตัวในหน่วยของ MeV ซึ่งรายละเอียดแสดงในเอกสารอ้างอิง [102] 98

C.3 แสดงข้อมูลเรโซแนนท์ของ Δ ที่บรรจุในแบบจำลอง QMD โดยข้อมูลเหล่านี้ได้แก่ มวลของเรโซแนนซ์ค่าความกว้างรวมและความกว้างบางส่วนของการสลายตัวในหน่วยของ MeV ซึ่งรายละเอียดแสดงในเอกสารอ้างอิง [102] 98

D.1 แสดงเวลา ตำแหน่งและพลังงานของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายหลังการชน . . . 105

D.2 แสดงโมเมนตัม มวล รหัส ID ประจุ และข้อมูลอื่นของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายหลังการชน 105

D.3 แสดงรหัส ID ของบาริออนและบาริออนเรโซแนนซ์ 106

D.4 แสดงรหัส ID ของเมซอนและเมซอนเรโซแนนซ์ 107