การศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบชาลโคไพไรท์กลุ่ม $I-III-VI_2$ โดยใช้หลักฉีพันธะและแถบพลังงาน

นางสาวประเสริฐ แข่งขัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2530

ISBN 974-568-286-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

013066

I10294896

Theoretical Study of Bonds and Bands in $I\text{-}III\text{-}VI_2$ Chalcopyrite Crystals

Miss Prasert Kengkan

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
Department of Physics
Graduate School
Chulalongkorn University
1987

ISBN 974-568-286-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบชาลโคไพไรท์กลุ่ม $I-III-VI_2$ โดยใช้หลักฐานพันธะและแถบพลังงาน

โดย นางสาวประเสริฐ แข่งขัน

ภาควิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณัต

อาจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนะ ภาะนันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณัต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เส็งหะพันธ์)

ประเสริฐ แช่งขัน : การศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบ ชาลโคไพไรท์ กลุ่ม $I-III-VI_2$ โดยใช้ทฤษฎีพันธะและแถบพลังงาน (Theoretical Study of Bands and Bands in $I-III-VI_2$ Chalcopyrite Crystals)
อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร.วิรุฬห์ สายคณิต, ดร.ชจรยศ อยู่ดี, 92 หน้า

การศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบโดยใช้ทฤษฎีพันธะเคมี ทำให้สามารถอธิบายได้ว่า พันธะที่ยึดเหนี่ยวให้แต่ละอะตอมเกาะกันเกิดเป็นผลึกเกิดได้อย่างไร เมื่อศึกษาร่วมกันกับทฤษฎีแถบพลังงาน ทำให้สามารถจำแนกโครงสร้างผลึกของสารประกอบไบนารีได้ถูกต้องถึง 97% และเมื่อใช้วิธีเดียวกันนี้กับสารประกอบเทอร์นารีทำให้สามารถทำนายการเกิดของสารประกอบเทอร์นารีได้ถูกต้องถึง 94%

เราได้ศึกษาการจำแนกโครงสร้างผลึกของสารประกอบไบนารีและสารประกอบเทอร์นารี โดยใช้ทฤษฎีของพอลิง (Pauling), ฟิลลิปส์ (Phillips), เซนต์จอห์น-บล็อก (St.John-Bloch), ซุงเกอร์ (Zunger) และวิลลาร์ส (Villars) จากนั้นเราได้ใช้ทฤษฎีเหล่านี้ศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบชาลโคไพไรท์กลุ่ม $I-III-VI_2$ และกลุ่ม $II-IV-V_2$ โดยใช้แนวความคิดของวิลลาร์ส พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างเตตระโกนอลดิสทอร์ชัน, 2-c/a, กับผลต่างของค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีของพันธะของสารมีลักษณะที่สามารถหาความสัมพันธ์ได้ และความสัมพันธ์ของเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน กับผลต่างของค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีของพันธะของสารทั้ง 2 กลุ่มยังแยกจากกันอย่างชัดเจน ในขณะที่การศึกษาโดยใช้ทฤษฎีซีทีบีของซุงเกอร์สามารถทำนายได้เพียงค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 กลุ่มเท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต ประเสริฐ แช่งขัน
สาขาวิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิรุฬห์ สายคณิต
ปีการศึกษา 2530 ชจรยศ อยู่ดี

PRASERT DENGKAN : THEORETICAL STUDY OF BONDS AND BANDS IN $I\text{-}III\text{-}VI_2$ CHALCOPYRITE CRYSTALS THESIS ADVISOR : PROF. VIRULH SA-YAKANIT, PH.D., DR. KAJORNYOD YOODEE, 92 PP.

The study of crystal structure using chemical bond theory allows us to understand the nature of chemical bonds, but it cannot predict crystal properties accurately. On the other hands the energy band theory which can predict crystal properties correctly cannot describe the difference of bond types in different crystals. The combination of both theories have been very successful in classification of binary and ternary crystals.

We study the classification of binary and ternary compounds using the theories of Pauling, Phillips, St. John-Bloch, Zunger, and Villars. We apply these theories to study the structures of $I\text{-}III\text{-}VI_2$ and $II\text{-}IV\text{-}V_2$ chalcopyrite compounds. The tetragonal distortion, 2-c/a, of both groups of chalcopyrite compounds are determined by using the approach of Villars. We have found that the relations between tetragonal distortion, 2-c/a, and the bonds electronegativity difference is correlated. Where Zunger's CTB theory can only give an average graph of tetragonal distortion an electronegativity difference of $I\text{-}III\text{-}VI_2$ and $II\text{-}IV\text{-}V_2$ graphs of compounds, this present dissertation finds that the relation of tetragonal distortion and electronegativity difference of both groups of compounds as falling into two distinctive groups.

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต ประเสริฐ เด่งคั่น

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความร่วมมือของท่านศาสตราจารย์ - ดร. วิรุฬห์ สายคณิต อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาจัดหาทุนการศึกษาให้ในระหว่างที่ทำการวิจัย และได้ร่วมมือกับ อาจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี อาจารย์ที่ปรึกษาอีกท่านหนึ่ง ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดเวลา รวมทั้งตรวจ แก้ไข ข้อเขียนในวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์จงอร พีรานนท์ ได้ช่วยอำนวยความสะดวกและให้กำลังใจตลอดเวลาที่ทำวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล ได้ให้ความรู้ความเข้าใจและตอบคำถามที่เป็นปัญหาทางด้านSolid State Physics อีกทั้งคอยให้กำลังใจ คุณพงษ์ ทรงพงษ์ และคุณธนา สุทธิโอภาส นิสิตปริญญามหาบัณฑิต ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ทั้งในการคำนวณและการพิมพ์วิทยานิพนธ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือดังกล่าวไว้ ณ ที่นี้

อนึ่ง ระหว่างการศึกษาปริญญามหาบัณฑิต ผู้เขียนได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาจากโครงการผู้ช่วยวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัยและฝ่ายวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบาญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ต
กิตติกรรมประกาศ ..... ฆ
สารบาญ ..... ง
รายการตารางประกอบ ..... ฉ
รายการภาพประกอบ ..... ฌ

บทที่

1. บทนำ 1
2. สสารในทัศนะของนักเคมี 3
   2.1 พันธะเคมี 3
      2.1.1 พันธะโลหะ 3
      2.1.2 พันธะเนื่องจากการเกิดอำนาจไฟฟ้า 4
      2.1.3 พันธะโควาเลนซ์ 4
   2.2 ค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีและฮีทออฟฟอร์เมชัน 6
   2.3 ความเป็นไอออนิก 8
   2.4 ไฮบริไดเซชัน 11
   2.5 ความเป็นไอออนิกตามทฤษฎีของคูลสัน 12
   2.6 การทำนายโครงสร้างผลึกโดยใช้ทฤษฎีพันธะเคมี 13
      2.6.1 การทำนายโครงสร้างผลึกโดยใช้พลังงานยึดเหนี่ยว 14
      2.6.2 การทำนายโครงสร้างผลึกของมูเซอร์และเปียร์สัน 14
   2.7 ระดับพลังงานในพันธะเคมี 15
3. สสารในทัศนะของนักฟิสิกส์ 19
   3.1 การเกิดแถบพลังงาน 19
   3.2 ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในผลึก 20
   3.3 การจำแนกชนิดของสสารโดยใช้ทฤษฎีแถบพลังงาน 22
   3.4 เทคนิคการคำนวณระดับพลังงานแบบไท-บายดิง 25
   3.5 แบบจำลองของอิเล็กตรอนอิสระ 27

3.6 แบบจำลองของอิเล็กตรอนที่ใกล้เป็นอิสระ.....30
4. ปัญหาโครงสร้างผลึกของสารประกอบไบนารี.....33
4.1 แบบจำลองของเพนน์.....34
4.2 ทฤษฎีของพิลลิปส์.....35
4.3 ซูโดโพเทนเชียล.....40
4.4 พลังงานศักย์ของไซมอนส์-บล็อก.....41
4.5 ค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีของวางโดจร.....44
4.6 ดัชนีสำหรับโครงสร้าง.....44
4.7 การจำแนกโครงสร้างผลึกของเซนต์จอห์นและบล็อก.....45
4.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกของเซลิคอวสกีและพิลลิปส์.....47
4.9 พลังงานศักย์ของซุงเกอร์.....51
4.10 การจำแนกสารตามลักษณะโครงสร้างผลึกของวิลลาร์ส.....53
5. เตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน ในสารประกอบชาลโคไพไรท์.....57
5.1 สารกึ่งตัวนำ.....57
5.1.1 สมบัติของสารกึ่งตัวนำ.....57
5.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำ.....58
5.2 ผลของเตตระโกนอล ดิสทอร์ชันต่อระดับพลังงาน.....62
6. ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการเกิดเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน.....70
6.1 สาเหตุของการเกิดเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน.....70
6.2 การอธิบายการเกิดเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน
โดยใช้ค่าอิเล็กโตรเนกติวิตี.....71
6.3 การอธิบายการเกิดเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน
โดยใช้รัศมีวงโดจรของอิเล็กตรอนในอะตอม.....72
6.4 ทฤษฎีซีพีบี.....74
6.5 การศึกษาเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน โดยใช้วิธีของวิลลาร์ส.....77
6.6 เปรียบเทียบผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีซีพีบีและผลจากการหา
ความสัมพันธ์ของ 2-c/a กับ $[R_{\ell}(A)-R_{\ell}(B)]/R_{\ell}(C)$.....81
7. สรุปและวิจารณ์.....86
เอกสารอ้างอิง.....89
ประวัติผู้เขียน.....93

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงออร์บิทอลของโมเลกุลที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุชนิดเดียวกัน 2 อะตอม	5
2.2	แสดงฟังก์ชันคลื่นที่เกิดจากการไฮบริไดเซชัน	5
2.3	แสดงค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีของธาตุต่างๆ ของพอลิง	6
2.4	แสดงตารางธาตุและการจัดตัวของวาเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมที่เป็นกลาง	9
2.5	แสดงการจำแนกโครงสร้างของสารโดยใช้ทฤษฎีของพอลิงของมูเซอร์และเบียร์สัน	16
2.6	แสดงลักษณะของฟังก์ชันคลื่นและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะที่มีการสร้างพันธะและต้านการสร้างพันธะ	17
3.1	แสดงลักษณะพลังงานศักย์และระดับพลังงานในอะตอม	20
3.2	แสดงพลังงานศักย์ในผลึกและพลังงานศักย์ในอะตอมอิสระ	20
3.3	แสดงการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	23
3.4	แสดงการแบ่งชนิดของสารโดยใช้ลักษณะแถบพลังงาน	24
3.5	แสดงลักษณะของพลังงานศักย์และระดับพลังงานในอะตอมอิสระและแถบพลังงานที่เกิดจากการนำอะตอมมาวางไกล้กัน	26
3.6	แสดงพลังงานศักย์ตามแบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ	27
3.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและโมเมนตัมของฮาร์โมนิกออสซิเลเตอร์	27
3.8	แสดงความหนาแน่นสถานะตามแนวความคิดก่อนที่จะมีทฤษฎีควอนตัม	28
3.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวคเตอร์คลื่นตามแบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ	29
3.10	แสดงความหนาแน่นสถานะตามแบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ	29
3.11	แสดงลักษณะแถบพลังงานที่ได้จากแบบจำลองอิเล็กตรอนที่ใกล้จะเป็นอิสระ.	31
4.1	แสดงช่องว่างแถบพลังงานที่เกิดจากการสร้างพันธะโควาเลนซ์และพันธะโควาเลนซ์ที่มีความเป็นไอออนิกอยู่ด้วย	37
4.2	แสดงการเขียนกราฟระหว่างค่า E_h ,C เพื่อหาค่ามุมเฟสของความเป็นไอออนิก	38
4.3	แสดงจำนวนอะตอมที่ล้อมรอบอะตอมกลางในผลึก	38
4.5	แสดงการจำแนกโครงสร้างผลึกของธาตุโดยใช้ดัชนีโครงสร้าง	

4.5 แสดงการจำแนกโครงสร้างผลึกของธาตุโดยใช้ดัชนีโครงสร้าง และค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีที่ไซมอนส์และบล็อกได้นิยามไว้ 45
4.6 แสดงการจำแนกสารประกอบไบนารีตามลักษณะโครงสร้างผลึก โดยใช้ค่ารัศมีวงโคจรของไซมอนส์และบล็อก 46
4.7 แสดงโครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์ 48
4.8 แสดงผลต่างระหว่างมุมระหว่างพันธะและผลต่างของค่าอิเล็กโตรเนกติวิตี ตามทฤษฎีของเชนต์ จอห์น และบล็อก 48
4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน c/a เทียบกับ r ในสารที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ 50
4.10 แสดงความสัมพันธ์ของเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน กับ ออร์บิทอลของพันธะ ในสารประกอบชาลโคไพไรท์กลุ่ม II-IV-V_2 50
4.11 แสดงผลการใช้รัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอน ในการจำแนกโครงสร้างผลึกของซุงเกอร์ 53
4.12 แสดงการจำแนกสารประกอบไบนารีตามลักษณะโครงสร้างผลึกของวิลลาร์ส. 54
4.13 แสดงแผนภาพที่ใช้ในการทำนายการเกิดของสารประกอบเทอร์นารี 55
5.1 แสดงโครงสร้างแบบเตตระฮีดรอล 58
5.2 แสดงประเภทของสารประกอบกึ่งตัวนำ 59
5.3 แสดงโครงสร้างผลึกชนิดต่างๆ ที่พบในสารกึ่งตัวนำ 60
5.4 แสดงลักษณะแถบพลังงานของสารประกอบชาลโคไพไรท์ เทียบกับแถบพลังงานของสารประกอบซิงค์เบลนด์ 63
5.5 แสดงกราฟระหว่างพารามิเตอร์ที่บอกถึงการแยกของระดับพลังงานที่เกิดจาก การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในผลึกและค่าเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน ในสารประกอบชาลโคไพไรท์กลุ่ม II-IV-V_2 64
5.6 แสดงกราฟระหว่างพารามิเตอร์ของการแยกของระดับพลังงานที่เกิดจาก การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในผลึกและค่าเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน ในสารประกอบชาลโคไพไรท์กลุ่ม I-III-VI_2 66
5.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในชั้นพลังงานย่อย d เมื่ออยู่ในสารประกอบที่มีการสร้างพันธะแบบเตตระฮีดรอล 67
5.8 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ $CuAlS_2$ และ $CuAlSe_2$ 68
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแถบช่องว่างพลังงานกับสัดส่วนของ d อิเล็กตรอนในระดับพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์ 69
6.1 แสดงความสัมพันธ์ของเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน และผลต่างของ

ค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีของพันธะตามทฤษฎีของซอกัทและสิงห์ 73
6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน กับผลต่างของ ค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีของพันธะ A-Cและ B-C ในสารประกอบชาลโคไพไรท์ ของซอกัทและฮัสเส็น 74
6.3 แสดงลักษณะการจัดเรียงอะตอมในส่วนหนึ่งของโครงสร้างแบบชาลโคไพไรท์.74
6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน และค่า s ตามนิยามของ ทฤษฎีซีซีทีบี 78
6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน กับผลต่างของ ค่าอิเล็กโตรเนกติวิตี $[R_i(A)-R_i(B)]/R_i(C)$ 78

6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง s ตามที่นิยามในทฤษฎีซีซีทีบี และผลต่างของ ค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีของพันธะตามนิยามของซอกัทและฮัสเส็น 81
6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 2-c/a กับ $[R_i(A)-R_i(B)]/R_i(C)$ ที่เป็นผล จากทฤษฎีซีซีทีบี 82
6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของอะตอมในขณะที่มีการสร้างพันธะ แบบเตตระฮีดรอล กับค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีที่อยู่ในรูปรัศมีวงโคจร ของอิเล็กตรอน 84

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 แสดงค่า 1'(1) ของธาตุต่างๆ 42

4.2 แสดงค่ารัศมีวงโคจรและค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีตามนิยามของ เซนต์ จอห์น-บูล็อก เทียบกับค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีของพอลิง และของฟิลลิปส์ 43

4.3 แสดงค่ารัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอนที่มีโมเมนตัมเชิงมุมต่างๆ ตามการคำนวณของซุงเกอร์ 52

5.1 แสดงค่าเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน และค่าความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน การเปลี่ยนแปลงช่องว่างแถบพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และผลจากสปิน-ออร์บิท คัปลิง ของสารประกอบชาลโคไพไรท์กลุ่ม $II-IV-V_2$ 64

5.2 แสดงค่าเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน และค่าความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน การเปลี่ยนแปลงช่องว่างแถบพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และผลจากสปิน-ออร์บิท คัปลิง ของสารประกอบชาลโคไพไรท์กลุ่ม $I-III-VI_2$ 65

6.1 แสดงค่ารัศมีของอะตอมในขณะที่มีการสร้างพันธะโควาเลนซ์แบบเตตระฮีดรอลของพอลิง 77

6.2 แสดงค่ารัศมีของอะตอมในขณะที่มีการสร้างพันธะโควาเลนซ์แบบเตตระฮีดรอลของดิทเทล 75

6.3 แสดงค่า d character ของสารประกอบชาลโคไพไรท์ 79

6.4 แสดงผลต่างของค่าอิเล็กโตรเนกติวิตีเมื่อ d character มีค่าต่างๆกัน 80

6.5, 6.6, 6.7 แสดงค่าเตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน ที่ได้จากผลการทดลองจากหลุยซีทีบี และ จากการหาความสัมพันธ์ของ 2-c/a กับ $[R_f(A)-R_f(B)]/R_f(C)$ 83

6.8 แสดงค่าความผิดพลาดของการคำนวณ เตตระโกนอล ดิสทอร์ชัน 85