

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม: 2531. ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ
ทำลายฤทธิ์ กำจัดฝังทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว
(ฉบับที่ 1) พ.ศ.2531. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2531. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 (พ.ศ.2531) ออกตาม
ความพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 เรื่องหน้าที่ของผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจ
การโรงงาน. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2539. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ออกตาม
ความพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2539 เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบาย
ออกจากโรงงาน. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กรรณิการ์ สิริสิงห. 2525. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์ . พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร:
บริษัท ประจวบรังศ์ จำกัด.
- กฤษณา แจ่มกลมลกุลชัย และปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2532. เฟอร์ไรต์. วารสารโลหะ วัสดุ และแร่: 63-69.
ขมิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์. 2539. การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิธีการ
ตกตะกอนผลึกทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คุณิ รัตนสุวรรณ. 2535. การกำจัดโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียโดยกระบวนการเฟอร์ไรต์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นฤมิต คินนิมาน. 2538. การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วย
ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- บุญยง โส่วงศ์วัฒน์. 2537. หลักการบำบัดน้ำเสีย จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร:
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (เอกสาร
ประกอบการสอน)
- ทองรัตน์ แก้วล้อม. 2537. แนวทางการบำบัดน้ำเสียซีโอดีในเขตกรุงเทพมหานคร.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิมล เรียบวัฒนา และ ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2539. เคมีสถานะแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 2.
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเคียนสโตร์.

- มนตรี บุญสิทธิ์. 2538. ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติของแมงกานีส-ซิงก์เฟอร์ไรต์.
 วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539. ภาวะพิษของดิน จากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:
 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุเมธ ชวเดช. 2535. การบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมีเทคนิค
 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (เอกสารประกอบการสอน)
- สุรณี โรจน์อารยานนท์. 2530. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย(จากห้องปฏิบัติการ)ด้วยกระบวนการ
 เฟอร์ไรต์. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย. 2540. การทำตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และ
 เถ้าลอยลิกไนต์เป็นตัวประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Akasaki, M. 1987. Treatment of cement wastewater. *Chemical Abstracts*107: Abstract No. 140512w.
- Aslam, S., and Walker, O. L. 1982. Recycling of mercury and silver from COD tests. *Water Pollution Control Federal*54: 1148-1151.
- Chen, C., Lu, K., Ma, Y., and et al. 1988. Treatment of wastewater containing heavy metals with magnetic cast iron powder. *Chemical Abstracts*109: Abstract No. 236331d.
- Cross, W. H., and McWilliams, R. 1979. Removal, recovery and reuse of silver and mercury from COD wastewater. Presented at the 117th Annual Am. Chemical Society Convention, Honolulu (April 1979). Cited by Gould, J. P., Masingale, M. Y., and Miller, M. 1984. Recovery of silver and mercury from COD samples by iron cementation. *Water Pollution Control Federal*56: 280-286.
- Dean, R. B. 1971. Disposal of mercury waste from water laboratories. *Environmental Science and Technology*.5: 1044. Cited by Gould, J. P., Masingale, M. Y., and Miller, M. 1984. Recovery of silver and mercury from COD samples by iron cementation. *Water Pollution Control Federal*56: 280-286.
- Ding, M., and Zeng, H. 1993. Treatment of heavy metal-containing wastewater by ferrite process. *Chemical Abstracts*118: Abstract No. 240006e.

- Ding, M., Zeng, H., and Zhao, B. 1993. Ferrite microcrystallization and heavy metal binding in neutral coprecipitation process. **Chemical Abstracts**118: Abstract No. 240004c.
- Freeman, H. M. 1989. **Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal**. New York: McGraw Hill Book Co.
- Fresenius, W., Quentin, K. E. And Schneider, W. 1988. **Water Analysis**. Germany: Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Goto, S., Nakura, T., and Okazuki, S. 1978. Active ferrite. **Chemical Abstracts**88: Abstract No. 202236j.
- Gould, J. P., Masingale, M. Y., and Miller, M. 1984. Recovery of silver and mercury from COD samples by iron cementation. **Water Pollution Control Federal**56: 280-286.
- Hayashi, S. 1975. Heavy metal treatment by ferritization. **Chemical Economy & Engineering Review**7: 32-43.
- Henci, V., Keskova, D., Mucha, P., and et al. 1995. Removal of toxic substances from wastewater containing heavy and other metals and formation of metal ferrites. **Chemical Abstracts**122: Abstract No. 298050p.
- Hendrickson, K. J., Benjamin, M. M., Ferguson, J.F., and et al. 1984. Removal of silver and mercury from spent COD test solution. **Water Pollution Control Federal**56: 468-473.
- Kazushiro, U., Takeshi, O. 1981. Removal of heavy metal ions from aqueous solutions of ferrite formation. **Chemical Abstracts**94.
- Kim, B. K. 1988. Removal of heavy metal by the ferrite process and characterization of sludges containing heavy metals. **Chemical Abstracts**108: Abstract No. 173000b.
- Kim, J. H., Kang, N. K., and Oh, J. H. 1991. Oxidation reaction behaviors of cobalt nickel hydroxide coprecipitates by oxygen in aqueous solution. Studies on the removal of heavy metals from wastewater by ferrite process-2. **Chemical Abstracts**115: Abstract No. 78037e.
- Kim, T. H., Kang, N. K., and Oh, J. H. 1991. Studies on the removal of heavy metals from wastewater by ferrite process. I. Oxidation reaction behaviors of copper and iron hydroxide coprecipitates by oxygen in aqueous solution. **Chemical Abstracts**115: Abstract No. 78027e.

- Kirk and Othmer. 1965. **Encyclopedia of Chemical and technology**. 2nd ed. Vol. 8. 894 pp.
Cited by Mandaokar, S. S., and Dharmadhikari, D. M. 1994. Retrieval of heavy metal ions from solution via ferritisation. **Environmental Pollution**83: 277-282.
- Kitano, M. 1994. Treatment of heavy metal- containing wastes. **Chemical Abstracts**121: Abstract No. 307623m.
- Kitamura, M., Honda, Y., and Takasuki, H. 1991. Treatment of wastewater containing heavy metal ion by ferrite process. II. Effect of phosphate ion concentration on wastewater treatment by ferrite process. **Chemical Abstracts**115: Abstract No. 98563b.
- Kiyama, M. 1974. Condition of the formation of Fe_3O_4 by the air oxidation of $Fe(OH)_2$ suspension. **Bull. of the Chemical Societ of Japan**47:1646-1650.
- Kojima, A., and Tanabe, N. 1995. Stabilization treatment of incinerator fly ashes containing heavy metals. **Chemical Abstracts**115: Abstract No. 88626e.
- Kojima, A., and Tanabe, N. 1995. Stabilization treatment of incineration fly ash containing heavy metals involving manufacture of ferrite material. **Chemical Abstracts**122: Abstract No. 298088g.
- Kondoh, M. 1994. Cr(III) removal from wastewater by ferrite method. **Chemical Abstracts**120: Abstract No. 225770x.
- Kondoh, M., Nakashima, N., and Hirasava, T. 1982. Treatment of wastewater containing heavy metal ions by ferrite formation 1. initial pH and dissolved oxygen on Fe_3O_4 formation by aerial oxidation of $Fe(OH)_2$ suspension. **Jpn Soc Powder Metal**29: 236-240.
- Kondoh, M., Nakashima, N., and Hirasava, T. 1992. Aeration of heavy metals ferritization. **Chemical Abstracts**117: Abstract No. 177621p.
- Kondoh, M., Nakashima, N., and Hirasava, T. 1992. Characteristics of heavy metal dissolution from zince, cadmium, and manganese bearing ferrites. **Chemical Abstracts**117: Abstract No. 156948k.
- Kondoh, M., Nakashima, N., and Hirasava, T. 1993. Possibility of copper-ferritization in the ferrite treatment of heavy metals containing wastewater. **Chemical Abstracts**118: Abstract No. 218951n.

- Kondoh, M., and Suzuki, A.. 1986. Ferrite formation and reduction mercury containing wastewater. **Chemical Abstracts104: Abstract No. 55757h.**
- Konrad, B. K., and Dennis, K. B.. 1995. **Introduction to Geochemistry.** 3th ed. New York: McGraw-Hill.
- Lin, Q., Zhao, G., Yuan, W. 1990. Chemical equilibrium calculation in treatment of wastewater containing chromium. **Chemical Abstracts112: Abstract No. 204089b.**
- Mandaokar, S. S., and Dharmadhikari, D. M. 1994. Retrieval of heavy metal ions from solution via ferritisation. **Environmental Pollution83: 277-282.**
- Manakan, S. E. 1990. **Environmental chemistry.** 4th ed. Chelsea, Mich: Lewis Pub.
- Nakashima, T. 1977. Removal of heavy metals from wastewater. **Chemical Abstracts87: Abstract No. 140832u.**
- Nakazawa, H., Sato, H., and Hasebe, S. 1989. Study on the removal of arsenic from hot wastewater by the ferrite formation method. **Chemical Abstracts111: Abstract No. 83476u.**
- Nippon Electric Co., Ltd. 1981. Heavy metal removal from wastewaters. **Chemical Abstracts95: Abstract No. 191933a.**
- Nippon Electric Co., Ltd. 1984. Wastewaters treatment with ferrite. **Chemical Abstracts101: Abstract No. 176936c.**
- Nugmanov, A. M., Kovalenko, Y. A., Firsova, L. Y., and et al. 1989. Kinetics of consumption of alkali in air oxidation of iron (II) precipitated in the presence of chromium (VI). **Chemical Abstracts110: Abstract No. 101084a.**
- Okuda et al. 1975. Removal of heavy metals from wastewater by ferric co-precipitation (Cent. Res. Lab. 57. Nippon Electric Co. Ltd.). **Kawasaki Japan Filter12(5):472-478.** Cited by Mandaokar, S. S., and Dharmadhikari, D. M. 1994. Retrieval of heavy metal ions from solution via ferritisation. **Environmental Pollution83: 277-282.**
- Sano, M., and Nakama, H. 1986. Treatment of wastewater containing heavy metals. **Chemical Abstracts104: Abstract No. 23805w.**

- Shin, H. D., Cho, D. S., and Oh, J. H. 1989. A study of ferrite process for heavy metal removal in wastewater (part 1). Ferrosoferric oxide formation by the oxidation of ferrous hydroxide suspension. **Chemical Abstracts**110: Abstract No. 178896z.
- Shin, H. D., Cho, D. S., and Oh, J. H. 1989. A study of ferrite process for heavy metal removal in wastewater (part 2). The formation and magnetic properties of copper ferrite. **Chemical Abstracts**110: Abstract No. 178897a.
- Smit, J., and Wijn, H. P.J. 1959. **Ferrites**. New York: John Wiley & Sons.
- Smith, F. G. 1963. **Physical Geochemistry**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Snelling, E. C. 1988. **Solf Ferrites Properties and Applications**. 2nd ed. London: Butterworths.
- Takada, T. 1980. Developmant and application of synthesizing technique of spinel ferrites by the wet method. In W. Hiroshi, I. Shuichi, and S. Mitsuo (eds.), **Ferrites**, pp. 3-6. Tokyo: Center for Academic Publication Japan.
- Tamaura, T., Kanzaki, T., and Katsura, T. 1980. Ti-, or V bearing ferrite by air (or NO₃) oxidation of aqueous suspension. In W. Hiroshi, I. Shuichi, and S. Mitsuo (eds.), **Ferrites**, pp. 15-19. Tokyo: Center for Academic Publication Japan.
- Tamaura, Y., Katsura, T., Rojarayanont, S., and et al. 1991. Ferrite process; heavy metal ions treatment system. **Water Science and Technology**.23: 1893-1900.
- Tamaura, Y., Tu, P. Q., Rojarayanont, S., and et al. 1991. Stabilization of Hazardous materials into ferrites. **Water Science and Technology**.23: 399-404.
- Tojo, T., and Nagata, y. 1978. Treatment of wastewater in a refuse treatment plant in Kawasaki city. II Treatment of dust caught by a dust collector in a refuse treatment plant by the ferrite method. **Chemical Abstracts**88: Abstract No. 78601h.
- Tokue, T., and Hasegawa, T. 1995. Stabilization of waste plating sludge. **Chemical Abstracts**122: Abstract No. 247399b.
- Topkin, Y. V., Roda, I. G., Anfinogenov, N. V., and et al. 1991. Removal of heavy-matal ions from solutions by a ferrite method. **Chemical Abstracts**114: Abstract No. 108263z.
- Toshihiko, M. And Nobuhiro, I. 1980. Heavy metal removal from wastewater. **Chemical Abstracts**93.

- Tsai, C. H. 1980. Treatment of wastewater containing chromium, zinc, nickel, cobalt and copper by the ferrite method. **Chemical Abstracts**92: Abstract No. 64204b.
- Tu, P. 1992. Experiment of removing fluorine ion with ferric sulfate process. **Chemical Abstracts**116: Abstract No. 158176k.
- Tu, P. 1992. Research of ferrite coating on neutralization precipitation sludges. **Chemical Abstracts**117: Abstract No. 33012t.
- Tu, P. 1993. Experimental study of ferrite membrane. **Chemical Abstracts**119: Abstract No. 124252d.
- Wang, W., Xu, Z., and Finch, J. 1996. Fundamental study of an ambient temperature ferrite process in the treatment of acid mine drainage. **Environmental Science and Technology**.30: 2604-2608.
- Wei, Y. Z., Wan, J. G., and Shan, W. C. 1981. Regressive-rotation design applied to wastewater treatment by using ferrites. **Chemical Abstracts**94.
- Wen, B., Li, D., and Liu, L. 1987. Treatment of electroplating and cation column regeneration wastewater by the ferrosphenel method at room temperature. **Chemical Abstracts**106: Abstract No. 143434n.
- Yang, K., Misra, M., and Mehta, R. 1995. Removal of heavy metal ions from acid mine water by ferrite coprecipitation process. **Chemical Abstracts**123: Abstract No. 16785d.
- Yamauchi, F., Nakano, S., and Sugano, I. 1980. Magnetic marker using ferrite-byproduct and its application. In W. Hiroshi, I. Shuichi, and S. Mitsuo (eds.), **Ferrites**, pp. 894-897. Tokyo: Center for Academic Publication Japan.
- Zonglei, H., Wuran, H., and Fangzhi, Y. 1989. Operation conditions for the ferrite method for chromium containing wastewater treatment. **Chemical Abstracts**111: Abstract No. 218829j.

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กฤษา จงศิริลักษณ์. 2530. การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียโดยกระบวนการเฟอร์ไรต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กฤษา วาณิชย์บัญชา. 2539. การวิเคราะห์สถิติ: สถิติเพื่อการตัดสินใจ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิทยาศาสตร์. ภาควิชาเคมี. 2535. เคมีทั่วไปเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิทยาศาสตร์. ภาควิชาฟิสิกส์. 2538. ฟิสิกส์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชูศรี วงศ์รัตนะ. 2537. เทคนิคการใช้สถิติเพื่อการวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดุสิต เครื่องงาม และ วิโรจน์ บุญโกสุมภ์. 2536. การประยุกต์ใช้ BSR ในงานวัสดุศาสตร์. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3(2): 111-140.
- ศุภสร ไรซ์ หมั่นสิทธิ์. 2535. ฟิสิกส์ของวัสดุ. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.

ภาษาอังกฤษ

- APHA, AWWA, and WEF. 1992. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 18th ed. Baltimore: EPS Group.
- Arthur, H. B. 1979. **Geochemistry.** Englewood Cliffs, N.J.: Printice Hall.
- Brian, M. 1966. **Principles of Geochemistry.** 3rd ed. New York: John Wiley&Sons.
- O'Neill, P. 1995. **Environmental Chemistry.** 2nd ed. London: Chapman&Hall.
- Smith, F. G. 1963. **Physical Geochemistry.** Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Smith, W. F. 1990. **Principle of Materials Science and Engineering.** 2nd ed. New York: McGraw Hill Book.
- The Lord Energlyn and Brealy, L. 1971. **Analytical Geochemistry Methods in Geochemistry and Geophysics.** Amsterdam: Elsevier.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก



ข้อมูลการทดลอง

การหาค่าพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม

ตารางที่ ก1 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เฟอร์ริซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาท)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-645	-651	-676
1	-650	-640	-652
2	-640	-626	-632
3	-638	-619	-628
4	-634	-616	-627
5	-627	-613	-622
6	-624	-611	-628
7	-620	-611	-616
8	-618	-610	-611
9	-615	-615	-609
10	-609	612	-606
11	-605	-607	-596
12	-601	-608	-597
13	-574	-585	-603
14	-580	-572	-601
15	-529	-570	-606
16	-471	-565	-575
17	-474	-561	-555
18	-355	-559	-538
19	-130	-363	-417
20	-53	-100	-326
21	-35	-34	-137
22	-28	-11	-63
23	-22	-5	-39
24	-18	-0.6	-29
25	-16	1.2	-22

ตารางที่ ก2 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียไฮดิ ที่พีเอช 10 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-315	-334	-225
1	-315	-336	-224
2	-312	-333	-224
3	-310	-328	-218
4	-307	-326	-218
5	-304	-325	-219
6	-298	-324	-218
7	-297	-320	-215
8	-290	-312	-211
9	-283	-304	-208
10	-280	-298	-201
11	-276	-290	-195
12	-270	-277	-187
13	-268	-265	-177
14	-260	-247	-168
15	-252	-232	-160
16	-243	-217	-153
17	-235	-203	-146
18	-226	-192	-141
19	-215	-180	-139
20	-208	-172	-134
21	-200	-165	-97
22	-195	-160	-69
23	-180	-134	-55
24	-107	-87	-48
25	-87	-67	-43
26	-76	-56	-40
27	-71	-50	-37
28	-67	-43	-35
29	-64	-40	-34
30	-63	-38	-33

ตารางที่ ก3 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 11 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาทีก)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-306	-358	-374
1	-304	-354	-376
5	-288	-336	-366
10	-259	-298	-324
11	-250	-291	-313
12	-248	-288	-305
13	-238	-282	-296
14	-229	-275	-290
15	-225	-267	-283
16	-217	-259	-275
17	-221	-250	-270
18	-214	-244	-266
19	-200	-235	-261
20	-198	-224	-257
21	-138	-214	-252
22	-119	-220	-249
23	-111	-222	-245
24	-105	-165	-240
25	-103	-127	-237
26	-101	-115	-232
27	-100	-110	-226
28	-98	-107	-218
29	-96	-104	-225
30	-95	-102	-211
31			-148
32			-123
33			-113
34			-110
35			-107

ตารางที่ ก4 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 12 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

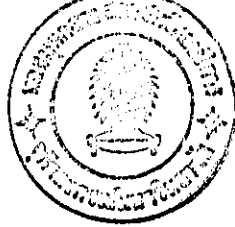
เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-710	-857	-642
1	-703	-853	-630
5	-637	-603	-552
10	-519	-500	-465
15	-460	-450	-433
20	-415	-427	-405
25	-376	-413	-390
30	-348	-414	-368
35	-316	-403	-354
36	-308	-396	-354
37	-298	-393	-353
38	-280	-390	-351
39	-272	-386	-346
40	-245	-383	-343
41	-215	-377	-335
42	-170	-371	-331
43	-152	-363	-330
44	-144	-357	-312
45	-131	-349	-292
46	-132	-341	-255
47	-133	-330	-262
48	-131	-303	-193
49	-130	-264	-159
50	-129	-266	-148
51	-128	-223	-141
52	-126	-175	-138
53	-126	-155	-136
54	-125	-148	-135
55	-124	-143	-132

ตารางที่ ๓5 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-629	-651	-682
1	-602	-505	655
2	-585	-473	-629
3	-589	-445	-613
4	-590	-425	-605
5	-592	-410	-603
6	-596	-398	-605
7	-598	-386	-600
8	-598	-375	-595
9	-598	-369	-592
10	-585	-363	-589
11	-579	-358	-580
12	-571	-355	-576
13	-563	-353	-568
14	-557	-354	-565
15	-548	-341	-563
16	-544	-325	-561
17	-480	-316	-560
18	-419	-121	-538
19	-392	-47	-529
20	-82	-25	-471
21	-44	-14	-252
22	-25	-8.0	-85
23	-20	-2.0	-36
24	-14	-1.4	-16
25	-11	-1.0	-10

ตารางที่ ๓๘ การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ทีพีเอช 10 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ ๓
0	-222	-294	-358
1	-220	-294	-356
2	-215	-292	-358
3	-211	-294	-360
4	-210	-297	-362
5	-209	-298	-357
6	-207	-301	-345
7	-203	-299	-336
8	-200	-295	-322
9	-193	-291	-308
10	-180	-285	-295
11	-167	-279	-280
12	-155	-275	-270
13	-147	-267	-254
14	-137	-260	-240
15	-127	-255	-223
16	-110	-245	-207
17	-72	-240	-195
18	-54	-228	-190
19	-45	-214	-116
20	-40	-209	-84
21	-37	-200	-74
22	-35	-189	-68
23	-35	-179	-64
24	-34	-155	-61
25	-34	-95	-60
26	-34	-70	-58
27	-33	-59	-57
28	-32	-53	-56
29	-31	-49	-55
30	-30	-45	-54



ตารางที่ ก7 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 11 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เฟอริทซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-244	-252	-315
1	-243	-249	-307
2	-240	-249	-308
3	-240	-246	-308
4	-235	-246	-312
5	-235	-245	-309
6	-226	-244	-306
7	-218	-243	-300
8	-208	-243	-295
9	-202	-238	-291
10	-195	-235	-285
11	-192	-233	-268
12	-188	-229	-273
13	-184	-225	-268
14	-180	-223	-262
15	-175	-220	-257
16	-172	-217	-251
17	-167	-214	-244
18	-165	-210	-238
19	-156	-205	-229
20	-148	-202	-229
21	-139	-200	-229
22	-137	-207	-152
23	-121	-174	-129
24	-85	-130	-121
25	-76	-115	-115
26	-70	-108	-111
27	-68	-103	-110
28	-68	-101	-108
29	-67	-100	-106
30	-66	-98	-105

ตารางที่ ๘ การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเคชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 12 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ ๓
0	-340	-850	-396
1	-339	-739	-394
5	-328	-525	-380
10	-305	-480	-353
15	-271	-438	-317
16	-266	-426	-312
17	-260	-419	-305
18	-255	-412	-290
19	-249	-405	-281
20	-240	-395	-274
21	-239	-385	-265
22	-237	-379	-258
23	-233	-365	-248
24	-227	-355	-205
25	-222	-348	-148
26	-215	-337	-130
27	-208	-322	-124
28	-200	-296	-120
29	-192	-266	-118
30	-177	-250	-117
31	-133	-160	-116
32	-113	-141	-115
33	-106	-135	-114
34	-105	-131	-113
35	-105	-128	-112
36	-103	-127	-111
37	-102	-125	-110
38	-102	-124	-109
39	-101	-122	-109
40	-100	-122	-109

ตารางที่ ก๑ การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เฟอริตซ์ลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-688	-575	-641
1	-666	-557	-637
2	-668	-540	-635
3	-688	-534	-629
4	-688	-530	-625
5	-663	-528	-612
6	-668	-525	-610
7	-660	-486	-606
8	-650	-465	-601
9	-636	-454	-575
10	-611	-453	-554
11	-591	-447	-532
12	-568	-435	-500
13	-533	-416	-491
14	-481	-403	-481
15	-524	-363	-460
16	-203	-263	-422
17	-50.2	-65.7	-285
18	-32.0	-29.3	-65.7
19	-10.0	-19.2	-21.6
20	-7.4	-15.4	-10.8
21	-4.2	-14.1	-3.8
22	-1.7	-11.0	0.3
23	0.6	-10.4	4.0
24	2.2	-8.7	5.5
25	3.9	-7.1	7.2

ตารางที่ ก10 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 10 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาทีก)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-279	-263	-351
1	-275	-258	-332
2	-275	-244	-324
3	-285	-234	-320
4	-274	-225	-315
5	-270	-217	-310
6	-260	-212	-302
7	-252	-207	-296
8	-245	-203	-287
9	-240	-199	-280
10	-235	-196	-271
11	-230	-194	-263
12	-225	-194	-252
13	-220	-192	-240
14	-205	-191	-230
15	-201	-191	-215
16	-198	-191	-195
17	-195	-194	-179
18	-193	-201	-159
19	-190	-210	-122
20	-184	-220	-95
21	-176	-215	-78
22	-173	-164	-66
23	-128	-134	-56
24	-105	-105	-50
25	-83	-85	-45
26	-75	-76	-43
27	-70	-66	-40
28	-66	-60	-38
29	-64	-56	-37
30	-61	-53	-36

ตารางที่ ก11 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 11 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-490	-244	-326
1	-466	-241	-324
2	-443	-241	-323
3	-417	-241	-320
4	-383	-240	-320
5	-351	-236	-313
6	-325	-235	-313
7	-300	-228	-308
8	-278	-221	-304
9	-256	-215	-303
10	-235	-208	-302
11	-220	-200	-300
12	-206	-195	-296
13	-190	-188	-290
14	-131	-182	-285
15	-107	-175	-273
16	-88	-168	-266
17	-79	-159	-256
18	-74	-149	-250
19	-71	-148	-241
20	-69	-114	-229
21	-68	-102	-160
22	-67	-96	-135
23	-66	-92	-123
24	-65	-90	-118
25	-64	-88	-116
26	-64	-87	-114
27	-63	-85	-112
28	-63	-84	-111
29	-62	-83	-110
30	-62	-82	-110

ตารางที่ ก12 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 12 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-322	-852	-874
1	-321	-836	-858
5	-305	-697	-743
10	-263	-568	-644
15	-224	-488	-581
16	-220	-460	-599
17	-217	-448	-581
18	-214	-431	-547
19	-211	-404	-532
20	-205	-370	-524
21	-197	-314	-520
22	-190	-189	-516
23	-182	-155	-509
24	-143	-146	-499
25	-120	-142	-493
26	-111	-138	-487
27	-104	-137	-465
28	-101	-134	-455
29	-100	-133	-444
30	-99	-132	-434
35	-98	-129	-380
37			-329
39			-265
41			-168
43			-155
45			-150

ตารางที่ ก18 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาท)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-690	-616	-654
1	-669	-615	-645
2	-671	-613	-633
3	-655	-623	-631
4	-652	-610	-630
5	-655	-599	-610
6	-655	-583	-588
7	-648	-572	-577
8	-644	-551	-566
9	-639	-529	-552
10	-634	-507	-535
11	-634	-450	-517
12	-633	-406	-501
13	-632	-320	-485
14	-630	-255	-470
15	-558	-93	-453
16	-475	-25	-435
17	-409	-8.1	-350
18	-355	-2.3	-306
19	-301	-1.4	-235
20	-249	4.4	-111
21	-125	6.0	-30
22	-62	7.9	-8.9
23	-35	9.0	2.5
24	-22	10.5	10.0
25	-16	11.5	12.1

ตารางที่ ก14 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีไอดี ที่พีเอช 10 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

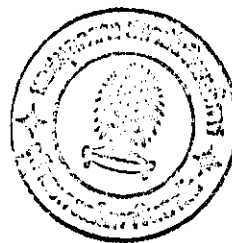
เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-376	-310	-358
1	-365	-294	-353
2	-359	-287	-350
3	-351	-286	-343
4	-349	-284	-341
5	-350	-281	-341
6	-350	-277	-339
7	-346	-272	-334
8	-340	-267	-326
9	-330	-259	-311
10	-318	-251	-304
11	-306	-244	-285
12	-293	-236	-267
13	-276	-225	-248
14	-260	-215	-230
15	-237	-206	-214
16	-220	-195	-198
17	-206	-184	-135
18	-193	-157	-79
19	-177	-87	-68
20	-140	-68	-59
21	-106	-62	-56
22	-87	-59	-54
23	-75	-56	-52
24	-67	-55	-51
25	-62	-53	-50
26	-58	-52	-50
27	-55	-52	-49
28	-52	-52	-49
29	-50	-52	-49
30	-49	-51	-48

ตารางที่ ก15 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 11 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-370	-357	-343
1	-368	-357	-341
2	-360	-352	-340
3	-350	-350	-339
4	-335	-350	-339
5	-320	-349	-335
6	-309	-347	-330
7	-297	-345	-325
8	-285	-342	-323
9	-271	-336	-316
10	-258	-334	-309
11	-245	-331	-302
12	-237	-326	-295
13	-229	-318	-285
14	-225	-311	-280
15	-225	-304	-274
16	-220	-293	-268
17	-215	-278	-263
18	-210	-259	-259
19	-201	-250	-251
20	-189	-170	-240
21	-178	-142	-235
22	-133	-132	-179
23	-118	-126	-129
24	-109	-124	-116
25	-105	-123	-111
26	-102	-122	-108
27	-100	-121	-106
28	-99	-120	-104
29	-97	-119	-103
30	-96	-119	-102

ตารางที่ ก16 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 12 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เฟอริสซัลเฟต 0.025 โมล

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-850	-612	-888
1	-840	-600	-879
5	-793	-579	-850
10	-720	-550	-822
15	-643	-499	-790
20	-551	-444	-736
25	-443	-376	-665
26	-426	-362	-650
27	-396	-330	-638
28	-376	-310	-627
29	-334	-296	-598
30	-287	-260	-572
31	-235	-173	-555
32	-200	-159	-545
33	-177	-153	-524
34	-168	-148	-511
35	-163	-147	-497
36	-160	-146	-477
37	-158	-145	-450
38	-155	-144	-423
39	-153	-144	-385
40	-152	-143	-352
41			-292
42			-188
43			-171
44			-161
45			-156
46			-153
47			-152
48			-151



การหาอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม

ตารางที่ ก17 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมล Fe(II)/M = 18.65

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-782	-790	-752
1	-777	-768	-741
2	-775	-755	-740
3	-768	-743	-742
4	-752	-737	-738
5	-748	-716	-736
6	-744	-702	-688
7	-734	-680	-653
8	-665	-652	-637
9	-190	-30	-160
10	31	-5	0.5
11	48	16	12
12	52	25	35
13	54	37	38
14	55	40	39
15	56	42	40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก18 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมล Fe(II)/M = 37.30

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-796	-814	-772
1	-790	-810	766
2	-800	-808	-765
3	-804	-805	-772
4	-797	-802	-778
5	-795	-802	-781
6	-795	-798	-785
7	-794	-785	-789
8	-790	-785	-792
9	-791	-780	-795
10	-790	-777	-794
11	-785	-757	-793
12	-782	-746	-782
13	-781	-731	-774
14	-777	-725	-760
15	-776	-685	-26
16	-775	-144	2
17	-775	-12	12
18	-778	6	15
19	-780	18	18
20	-782	22	20
25	-735		
26	-617		
27	-538		
28	-83		
29	-43		
30	-15		

ตารางที่ ก19 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอดี ทีทีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมล Fe(II)/M = 74.60

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-795	-777	-790
1	-788	-771	-784
5	-765	-776	-792
10	-744	-771	-780
15	-787	-775	-790
20	-795	-775	-794
21	-794	-770	-789
22	-793	-732	-778
23	-788	-680	-765
24	-769	-652	-710
25	-743	-551	-675
26	-726	-550	-564
27	718	-267	-452
28	-715	-122	-70
29	-697	-72	-35
30	-668	-33	-8
31	-632	-26	15
32	-563	2	26
33	-417	8	30
34	-182	11	35
35	-62	14	38
36	-19	15	
37	2	17	
38	10	18	
39	15	19	
40	17	20	

ตารางที่ ก20 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีไอที ทีพีเอส 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมล Fe(II)/M = 149.20

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-818	-757	-807
1	-779	-744	-800
5	-772	-724	-795
10	-773	-774	-798
15	-758	-770	-801
20	-751	-793	-791
25	-783	-780	-795
30	-777	-778	-780
35	-768	-772	-660
40	-757	-732	-528
41	-752	-698	473
42	-745	-683	-415
43	-739	-636	-354
44	-724	-612	-285
45	-722	-597	-215
46	-688	-545	-173
47	-658	-542	-151
48	-637	-540	-104
49	-616	-487	-92
50	-588	-424	-60
51	-563	-380	-30
52	-516	-275	-11
53	-504	-199	-2
54	-444	-168	5
55	-368	-144	8
56	-149	-125	
57	-95	-114	
58	-77	-108	
59	-69	-90	
60	-61	-75	

ตารางที่ ก21 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล ของการกำจัดโลหะหนัก
จากน้ำเสียซีโอไลท์ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 C อัตราส่วนโมล Fe(II)/M = 149.20 (ไม่ใช่ N₂)

เวลา (นาที)	ค่า ORP(mv) ของการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	-805	-811	-789
1	-801	-810	-792
5	-780	-805	-798
10	-792	-800	-775
15	-804	-792	-773
20	-786	-788	-772
25	790	-789	-775
30	-796	-795	-779
35	-726	-790	-789
40	-628	-767	-785
41	-574	-752	-755
42	-525	-748	-726
43	-417	-725	-700
44	-389	-652	-685
45	-280	-628	-632
46	-243	-601	-597
47	-182	-521	-588
48	-90	-480	-554
49	-22	-430	-506
50	5	-398	-474
51	11	-324	-397
52	15	-257	-310
53	21	-168	-140
54	57	-39	-20
55	33	9	1
56		12	11
57		17	16
58		19	20
59		19	22
60		20	24

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองด้วยสถิติ

การหาค่าพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม

ก. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปรอท

ตารางที่ ข1 ผลปริมาณปรอทที่เหลือ(มก/ล)ในน้ำเสียซีไอดี จากการกำจัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ด้วยค่าพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.025 โมล

ครั้งที่	อุณหภูมิ(°C)	พีเอช			
		9	10	11	12
1	55	0.105	0.557	4.690	8.384
2	55	0.047	0.427	4.096	8.232
3	55	0.108	0.524	2.854	6.520
1	60	0.097	0.294	0.986	4.196
2	60	0.072	0.402	1.401	10.384
3	60	0.103	0.746	1.412	5.118
1	65	0.066	0.194	0.347	0.689
2	65	0.081	0.124	0.666	3.508
3	65	0.070	0.170	1.583	1.682
1	70	0.018	0.129	0.476	1.925
2	70	0.048	0.010	1.751	2.192
3	70	0.055	0.116	1.160	2.114



ตารางที่ ข2 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข1

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
อุณหภูมิ	3	43.14	14.38	14.38 ^{* 1}
พีเอช	3	154.58	51.53	51.53 ^{* 2}
อุณหภูมิและพีเอช	9	55.75	6.19	6.19 ^{* 3}
ความคลาดเคลื่อน	32	31.93	1.00	
ผลรวม	47	285.40		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ (α) .05 : $F_{.05(3,32)} = 2.90$; $F_{.05(9,32)} = 2.19$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลในการกำจัดปรอทแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

²: แต่ละค่าของพีเอชทำให้เกิดผลในการกำจัดปรอทแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

³: แต่ละค่าของทั้งอุณหภูมิและพีเอชทำให้เกิดผลในการกำจัดปรอทแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข3 ผลของปริมาณปรอทที่เหลือ(มก/ล)ในน้ำเสียซีไอดี จากการกำจัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ พีเอช 9 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.025 โมล

ครั้งที่	อุณหภูมิ(°C)			
	55	60	65	70
1	0.105	0.097	0.066	0.018
2	0.047	0.072	0.081	0.048
3	0.108	0.103	0.070	0.055

ตารางที่ ข4 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข3

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
ระหว่างอุณหภูมิ	3	0.005	0.002	4.00 ¹
ภายในอุณหภูมิ	8	0.004	0.0005	
ผลรวม	11	0.009		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ (α) .05 : $F_{.05(3,8)} = 4.07$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลในการกำจัดปรอทแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ข. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของโครเมียม

ตารางที่ ข5 ผลปริมาณโครเมียมที่เหลือ(มก/ล)ในน้ำเสียซีไอดี จากการกำจัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ ด้วยค่าพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ ปริมาณเพอร์สซัลเฟต 0.025 โมล

ครั้งที่	อุณหภูมิ(°C)	พีเอช			
		9	10	11	12
1	55	0.18	0.70	0.74	1.92
2	55	0.11	0.68	0.82	1.64
3	55	0.13	0.66	0.90	1.64
1	60	0.21	0.76	0.64	1.08
2	60	0.13	0.58	0.70	1.44
3	60	0.15	0.64	0.78	1.22
1	65	0.16	0.50	0.62	1.50
2	65	0.16	0.66	0.60	1.50
3	65	0.11	0.62	0.68	1.58
1	70	0.20	0.48	0.58	1.80
2	70	0.13	0.50	0.92	1.50
3	70	0.11	0.58	0.62	1.50

ตารางที่ ข6 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข5

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
อุณหภูมิ	3	0.15	0.05	5.00 ^{* 1}
พีเอช	3	11.82	3.94	394 ^{* 2}
อุณหภูมิและพีเอช	9	0.33	0.037	3.70 ^{* 3}
ความคลาดเคลื่อน	32	0.33	0.010	
ผลรวม	47	12.63		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{.05}(3,32) = 2.90$; $F_{.05}(9,32) = 2.19$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลในการกำจัดโครเมียมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

²: แต่ละค่าของพีเอชทำให้เกิดผลในการกำจัดโครเมียมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

³: แต่ละค่าของทั้งอุณหภูมิและพีเอชทำให้เกิดผลในการกำจัดโครเมียมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข7 ผลของปริมาณโครเมียมที่เหลือ(มก/ล)ในน้ำเสียซีโอดี จากการกำจัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ พีเอช 9 ปริมาณเพอร์สซัลเฟต 0.025 โมล

ครั้งที่	อุณหภูมิ(°C)			
	55	60	65	70
1	0.18	0.21	0.16	0.20
2	0.11	0.13	0.16	0.13
3	0.13	0.15	0.11	0.11

ตารางที่ ข8 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข7

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
ระหว่างอุณหภูมิ	3	0.001	3.33×10^{-4}	0.22 ¹
ภายในอุณหภูมิ	8	0.012	1.50×10^{-3}	
ผลรวม	11	0.013		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{.05}(3,8) = 4.07$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลในการกำจัดโครเมียมแตกต่างกันอย่างไรไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเหล็ก

ตารางที่ ข๑ ผลปริมาณเหล็กที่เหลือ(มก/ล)ในน้ำเสียซีไอดี จากการกำจัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ด้วยค่าพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.025 โมล

ครั้งที่	อุณหภูมิ(°C)	พีเอช			
		9	10	11	12
1	55	0.168	0.146	0.174	0.190
2	55	0.189	0.182	0.204	0.136
3	55	0.143	0.188	0.166	0.234
1	60	0.091	0.130	0.130	0.188
2	60	0.136	0.134	0.102	0.234
3	60	0.122	0.170	0.190	0.210
1	65	0.122	0.164	0.164	0.694
2	65	0.142	0.234	0.296	0.450
3	65	0.101	0.156	0.236	0.500
1	70	0.175	0.122	0.156	1.200
2	70	0.126	0.176	0.156	0.826
3	70	0.073	0.102	0.116	0.930

ตารางที่ ข10 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข๑

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
อุณหภูมิ	3	0.29	0.10	22.86 ^{* 1}
พีเอช	3	0.98	0.33	75.43 ^{* 2}
อุณหภูมิและพีเอช	9	1.00	0.11	25.14 ^{* 3}
ความคลาดเคลื่อน	32	0.14	0.004	
ผลรวม	47	2.41		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{.05}(3,32) = 2.90$; $F_{.05}(9,32) = 2.19$

¹ : แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลในการกำจัดเหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

² : แต่ละค่าของพีเอชทำให้เกิดผลในการกำจัดเหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

³ : แต่ละค่าของทั้งอุณหภูมิและพีเอชทำให้เกิดผลในการกำจัดเหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข11 ผลปริมาณเหล็กที่เหลือ(มก/ล)ในน้ำเสืซซีโอดี จากการกำจัดด้วยกระบวนการเฟอไรไรด์ ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ทีเอช 9 ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล

ครั้งที่	อุณหภูมิ(°C)			
	55	60	65	70
1	0.168	0.091	0.122	0.175
2	0.189	0.136	0.142	0.126
3	0.143	0.122	0.101	0.073

ตารางที่ ข12 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข11

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
ระหว่างอุณหภูมิ	3	0.005	0.002	2 ¹
ภายในอุณหภูมิ	8	0.008	0.001	
ผลรวม	11	0.013		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{.05}(3,8) = 4.07$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลในการกำจัดเหล็กแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของจำนวนอิเล็กทรอนิกส์อนไร์คู่

ตารางที่ ข18 ผลจำนวนอิเล็กทรอนิกส์อนไร์คู่(10^8 ตัว) ของตะกอนเฟอร์ไรท์ จากการกำจัดโลหะหนัก ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ด้วยค่าพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ ปริมาณเฟอร์สซัลเฟต 0.025 โมล

ครั้งที่	อุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)	พีเอช			
		9	10	11	12
1	55	9.98	5.98	5.90	4.75
2	55	9.17	5.13	3.47	1.70
3	55	10.40	3.30	3.80	1.81
1	60	11.20	7.22	5.22	7.35
2	60	10.30	3.28	4.45	4.61
3	60	9.77	6.81	4.94	5.93
1	65	13.20	13.80	10.60	7.79
2	65	11.80	4.66	5.54	5.23
3	65	13.30	13.60	5.32	5.87
1	70	8.34	9.48	11.10	10.10
2	70	9.29	5.40	5.75	6.37
3	70	11.20	5.22	6.82	6.92

ตารางที่ ข14 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข13

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
อุณหภูมิ	3	94.86	31.62	6.93 ^{* 1}
พีเอช	3	185.28	61.76	13.54 ^{* 2}
อุณหภูมิและพีเอช	9	50.71	5.63	1.23 ³
ความคลาดเคลื่อน	32	145.78	4.56	
ผลรวม	47	476.63		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{0.05}(3,32) = 2.90$; $F_{0.05}(9,32) = 2.19$

¹ : แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลต่อจำนวนอิเล็กทรอนิกส์อนไร์คู่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

² : แต่ละค่าของพีเอชทำให้เกิดผลต่อจำนวนอิเล็กทรอนิกส์อนไร์คู่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

³ : อุณหภูมิและพีเอชไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อผลจำนวนอิเล็กทรอนิกส์อนไร์คู่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข15 ผลจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่(10^8 ตัว)ของตะกอนเฟอร์ไรต์ จากการกำจัดโลหะหนักด้วย กระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ทีเอช 9 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.025 โมล

ครั้งที่	อุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)			
	55	60	65	70
1	9.98	11.20	13.20	8.34
2	9.17	10.30	11.80	9.29
3	10.40	9.77	13.30	11.20
เฉลี่ย	9.85	10.42	12.77	9.61

ตารางที่ ข16 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข15

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
ระหว่างอุณหภูมิ	3	18.75	6.25	6.65 [*] 1
ภายในอุณหภูมิ	8	7.48	0.94	
ผลรวม	11	26.23		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{.05(3,8)} = 4.07$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข17 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย LSD ของข้อมูลตารางที่ ข15

$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	ผลสรุป
$ \bar{X}_{55} - \bar{X}_{70} = 9.85 - 9.61 = 0.24$	< LSD
$ \bar{X}_{60} - \bar{X}_{55} = 10.42 - 9.85 = 0.57$	< LSD
$ \bar{X}_{60} - \bar{X}_{70} = 10.42 - 9.61 = 0.81$	< LSD
$ \bar{X}_{65} - \bar{X}_{60} = 12.77 - 10.42 = 2.35^*$	> LSD
$ \bar{X}_{65} - \bar{X}_{55} = 12.77 - 9.85 = 2.92^*$	> LSD
$ \bar{X}_{65} - \bar{X}_{70} = 12.77 - 9.61 = 3.16^*$	> LSD

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $LSD_{.05} = 1.83$

สรุปความแตกต่างดังนี้ อุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$) 70 55 60 65

อุณหภูมิที่ขีดเส้นใต้หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ .05

การหาอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม

ก. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปรอท

ตารางที่ ข18 ผลของปริมาณปรอทที่เหลือ(มก/ล)ในน้ำเสียซีไอดี จากการกำจัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ ที่อุณหภูมิ 65°C ทีเอช 9 ด้วยอัตราส่วน โมลต่างๆ

ครั้งที่	อัตราส่วนโมลของเฟอร์รัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด			
	18.65	37.30	74.60	149.20
1	0.253	0.031	0.039	0.019
2	0.230	0.039	0.028	0.032
3	0.110	0.082	0.022	0.023

ตารางที่ ข19 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข18

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
ระหว่างอุณหภูมิ	3	0.060	0.020	10* ¹
ภายในอุณหภูมิ	8	0.014	0.002	
ผลรวม	11	0.074		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{.05(3,8)} = 4.07$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลในการกำจัดปรอทแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข20 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย LSD ของข้อมูลตารางที่ ข18

$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	ผลสรุป
$ \bar{X}_{18.65} - \bar{X}_{149.20} = 0.198 - 0.025 = 0.173^*$	> LSD
$ \bar{X}_{18.65} - \bar{X}_{74.60} = 0.198 - 0.030 = 0.168^*$	> LSD
$ \bar{X}_{18.65} - \bar{X}_{37.30} = 0.198 - 0.051 = 0.147^*$	> LSD
$ \bar{X}_{37.30} - \bar{X}_{149.20} = 0.051 - 0.025 = 0.026$	< LSD
$ \bar{X}_{37.30} - \bar{X}_{74.60} = 0.051 - 0.030 = 0.021$	< LSD
$ \bar{X}_{74.60} - \bar{X}_{149.20} = 0.030 - 0.025 = 0.005$	< LSD

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $LSD_{.05} = 0.084$

สรุปความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยได้ดังนี้ อัตราส่วนโมล Fe(II)/M 18.65 37.30 74.60 179.20
อัตราส่วนโมลที่ขีดเส้นใต้หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันที่ α .05

ข. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของโครเมียม

ตารางที่ ข21 ผลของปริมาณ โครเมียมที่เหลือ(มก/ล)ในน้ำเสียซีไอดี จากการกำจัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ ที่อุณหภูมิ 65°C ทีเอช 9 ด้วยอัตราส่วน โมลต่างๆ

ครั้งที่	อัตราส่วนโมลของเพอร์ริชัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด			
	18.05	37.30	74.60	149.20
1	0.294	0.264	0.241	0.212
2	0.359	0.284	0.252	0.197
3	0.335	0.357	0.251	0.195

ตารางที่ ข22 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข21

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
ระหว่างอุณหภูมิ	3	0.030	0.010	10* ¹
ภายในอุณหภูมิ	8	0.007	0.001	
ผลรวม	11	0.037		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{.05}(3,8) = 4.07$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลในการกำจัดโครเมียมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข23 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย LSD ของข้อมูลตารางที่ ข21

$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	ผลสรุป
$ \bar{X}_{18.65} - \bar{X}_{149.20} = 0.329 - 0.201 = 0.128^*$	> LSD
$ \bar{X}_{18.65} - \bar{X}_{74.60} = 0.329 - 0.248 = 0.081^*$	> LSD
$ \bar{X}_{18.65} - \bar{X}_{37.30} = 0.329 - 0.302 = 0.027$	< LSD
$ \bar{X}_{37.30} - \bar{X}_{149.20} = 0.302 - 0.201 = 0.101^*$	> LSD
$ \bar{X}_{37.30} - \bar{X}_{74.60} = 0.302 - 0.248 = 0.054$	< LSD
$ \bar{X}_{74.60} - \bar{X}_{149.20} = 0.248 - 0.201 = 0.047$	< LSD

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $LSD_{.05} = 0.060$

สรุปความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยได้ดังนี้ อัตราส่วนโมล Fe(II)/M 8.65 37.30 74.60 149.20
 อัตราส่วน โมลที่ขีดเส้นใต้หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ที่ α .05

ก. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเหล็ก

ตารางที่ ข24 ผลของปริมาณเหล็กที่เหลือ(มก/ล)ในน้ำเสียซีโอดี จากการกำจัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ ที่อุณหภูมิ 65°C ทีเอช 9 ด้วยอัตราส่วนโมลต่างๆ

ครั้งที่	อัตราส่วนโมลของเพอร์ริชัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด			
	18.65	37.30	74.60	149.20
1	0.192	0.078	0.049	0.030
2	0.185	0.187	0.115	0.022
3	0.164	0.215	0.056	0.057

ตารางที่ ข25 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข24

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
ระหว่างอุณหภูมิ	3	0.042	0.014	7* ¹
ภายในอุณหภูมิ	8	0.015	0.002	
ผลรวม	11	0.057		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{.05}(3,8) = 4.07$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลในการกำจัดเหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข26 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย LSD ของข้อมูลตารางที่ ข24

$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	ผลสรุป
$ \bar{X}_{18.65} - \bar{X}_{149.20} = 0.180 - 0.036 = 0.144^*$	> LSD
$ \bar{X}_{18.65} - \bar{X}_{74.60} = 0.180 - 0.073 = 0.107^*$	> LSD
$ \bar{X}_{18.65} - \bar{X}_{37.30} = 0.180 - 0.160 = 0.020$	< LSD
$ \bar{X}_{37.30} - \bar{X}_{149.20} = 0.160 - 0.036 = 0.124^*$	> LSD
$ \bar{X}_{37.30} - \bar{X}_{74.60} = 0.160 - 0.073 = 0.087^*$	> LSD
$ \bar{X}_{74.60} - \bar{X}_{149.20} = 0.073 - 0.036 = 0.037$	< LSD

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $LSD_{.05} = 0.060$

สรุปความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยได้ดังนี้ อัตราส่วนโมล Fe(II)/M 8.65 37.30 74.60 149.20
อัตราส่วนโมลที่ขีดเส้นใต้หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ที่ α .05

ง. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ไอรีจ

ตารางที่ ข27 ผลจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ไอรีจ (10^8 ตัว) ของตะกอนที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิ 65°C พีเอช 9 ด้วยอัตราส่วนโมลต่างๆ

ครั้งที่	อัตราส่วนโมลของเฟอร์รัสซัลเฟตต่อไดออกไซด์ทั้งหมด			
	18.65	37.30	74.60	149.20
1	9.05	11.8	10.9	14.4
2	11.5	9.84	11.4	13.5
3	10.2	12.0	12.1	14.0

ตารางที่ ข28 ANOVA ของข้อมูลตารางที่ ข27

แหล่งแปรปรวน	DF	SS	MS = SS/DF	F = MS/MSE
ระหว่างอุณหภูมิ	3	22.59	7.53	8.66* ¹
ภายในอุณหภูมิ	8	6.99	0.87	
ผลรวม	11	29.58		

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $F_{.05}(3,8) = 4.07$

¹: แต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ไอรีจแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข29 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย LSD ของข้อมูลตารางที่ ข27

$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	ผลสรุป
$ \bar{X}_{149.20} - \bar{X}_{18.65} = 14.0 - 10.3 = 3.7^*$	> LSD
$ \bar{X}_{149.20} - \bar{X}_{37.30} = 14.0 - 11.2 = 2.8^*$	> LSD
$ \bar{X}_{149.20} - \bar{X}_{74.60} = 14.0 - 11.5 = 2.5^*$	> LSD
$ \bar{X}_{74.60} - \bar{X}_{18.65} = 11.5 - 10.3 = 1.2$	< LSD
$ \bar{X}_{74.60} - \bar{X}_{37.30} = 11.5 - 11.2 = 0.3$	< LSD
$ \bar{X}_{37.30} - \bar{X}_{18.65} = 11.2 - 10.3 = 0.9$	< LSD

หมายเหตุ ระดับนัยสำคัญ(α) .05 : $LSD_{.05} = 1.76$

สรุปความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยได้ดังนี้ อัตราส่วนโมล Fe(II)/M

18.65 37.30 74.60 149.20

อัตราส่วนโมลที่ขีดเส้นใต้หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ที่ α .05

18.65 37.30 74.60 149.20

การเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้แก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเฟอร์ไรต์

ตารางที่ ข30 ผลการใช้และไม่ใช้แก๊สไนโตรเจนในการกำจัดปรอทด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์
ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.1 โมล

ครั้งที่	ความเข้มข้นปรอท(มก/ล)	
	ใช้แก๊สไนโตรเจน	ไม่ใช้แก๊สไนโตรเจน
1	0.019	0.040
2	0.032	0.038
3	0.023	0.040

ตารางที่ ข31 ผลการทดสอบค่าที (t) ของข้อมูลตารางที่ ข30

สมมติฐาน	t (.5, 4)	t คำนวณ	ผลสรุป
$H_0 : \mu_1 = \mu_2$	2.776	3.579*	t คำนวณ > t ตาราง
$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$			ยอมรับ H_1

หมายเหตุ ยอมรับ H_1 หมายถึงค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นปรอทของการใช้แก๊สไนโตรเจนและไม่ใช้แก๊สไนโตรเจนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข32 ผลการใช้และไม่ใช้แก๊สไนโตรเจนในการกำจัดโครเมียมด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์
ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.1 โมล

ครั้งที่	ความเข้มข้นโครเมียม(มก/ล)	
	ใช้แก๊สไนโตรเจน	ไม่ใช้แก๊สไนโตรเจน
1	0.212	0.108
2	0.197	0.119
3	0.195	0.125

ตารางที่ ข33 ผลการทดสอบค่าที (t) ของข้อมูลตารางที่ ข32

สมมติฐาน	t (.5, 4)	t คำนวณ	ผลสรุป
$H_0 : \mu_1 = \mu_2$	2.776	11.46*	t คำนวณ > t ตาราง
$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$			ยอมรับ H_1

หมายเหตุ ยอมรับ H_1 หมายถึงค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นโครเมียมของการใช้แก๊สในโตรเจนและไม่ใช้แก๊สในโตรเจนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ ข34 ผลการใช้และไม่ใช้แก๊สในโตรเจนในการกำจัดเหล็กด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์

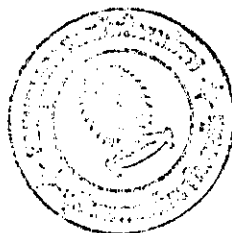
ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.1 โมล

ครั้งที่	ความเข้มข้นเหล็ก(มก/ล)	
	ใช้แก๊สในโตรเจน	ไม่ใช้แก๊สในโตรเจน
1	0.030	0.011
2	0.022	0.015
3	0.057	0.036

ตารางที่ ข35 ผลการทดสอบค่าที (t) ของข้อมูลตารางที่ ข34

สมมติฐาน	t (.5, 4)	t คำนวณ	ผลสรุป
$H_0 : \mu_1 = \mu_2$	2.776	1.14	t คำนวณ < t ตาราง
$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$			ยอมรับ H_0

หมายเหตุ ยอมรับ H_0 หมายถึงค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นเหล็กของการใช้แก๊สในโตรเจนและไม่ใช้แก๊สในโตรเจนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05



ตารางที่ ข36 ผลการใช้และไม่ใช้แก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเฟอร์ไรต์ ซึ่งแสดงผลจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่(10^8 ตัว)ของตะกอนที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.1 โมล

ครั้งที่	จำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่(10^8 ตัว)	
	ใช้แก๊สไนโตรเจน	ไม่ใช้แก๊สไนโตรเจน
1	14.4	12.5
2	13.5	12.4
3	14.0	12.1

ตารางที่ ข37 ผลการทดสอบค่าที (t) ของข้อมูลตารางที่ ข36

สมมติฐาน	t (.5, 4)	t จำนวน	ผลสรุป
$H_0 : \mu_1 = \mu_2$	2.776	5.90*	t จำนวน > t ตาราง
$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$			ยอมรับ H_1

หมายเหตุ ยอมรับ H_1 หมายถึงค่าเฉลี่ยจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่ของการใช้แก๊สไนโตรเจนและไม่ใช้แก๊สไนโตรเจนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สถิติ

การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติคือ การทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากตัวอย่างเพื่อสรุปว่า สมมติฐานหรือสิ่งที่คาดไว้จริงหรือไม่ มีขั้นตอนต่างๆดังนี้คือ(กัลยา วานิชย์บัญชา, 2539)

1. ตั้งสมมติฐานเพื่อการทดสอบ จะต้องประกอบด้วยสมมติฐาน 2 ชนิดทุกครั้งที่ของการทดสอบคือ 1) สมมติฐานว่าง (Null Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_0

2) สมมติฐานแย้ง (Alternative Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_1

สมมติฐาน H_0 และ H_1 จะอยู่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามเสมอ

2. กำหนดและคำนวณค่าสถิติทดสอบ ถ้าเป็นการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 3 ค่าขึ้นไป จะใช้สถิติทดสอบ F และถ้าเป็นการทดสอบค่าเฉลี่ย 2 ค่า จะใช้สถิติทดสอบ t หรือ Z

3. กำหนดระดับนัยสำคัญ(α) โดยทั่วไปมักจะกำหนดให้ $\alpha = .01$ และ $.05$ หรือกำหนดความเชื่อมั่นเป็น $(1 - \alpha)100\%$ การแปลความหมาย (ชูศรี วงศ์รัตน์, 2537)ถ้าได้ผลว่าปฏิเสธ H_0 แต่ยอมรับ H_1 ที่ระดับนัยสำคัญที่ตั้งไว้ (สมมติให้ $\alpha = .05$) จะแปลความหมายในรูปของนัยสำคัญได้ว่า ในการทดสอบเรื่องนั้นๆมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ $.05$ (ถ้าเป็นการทดสอบความแตกต่าง) หรือในการทดสอบเรื่องนั้นๆ มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $.05$ (ถ้าเป็นการทดสอบความสัมพันธ์) และจะแปลความหมายในรูปของระดับความเชื่อมั่นได้ว่า ในการทดสอบเรื่องนั้นๆจำนวน 100 ครั้ง จะให้ผลดังที่ปรากฏ 95 ครั้ง และผิดพลาดไปจากผลที่ปรากฏไม่เกิน 5 ครั้ง

4. การสร้างเขตปฏิเสธสมมติฐาน H_0 คือการหาค่าวิกฤตซึ่งเป็นค่าที่แบ่งเขตปฏิเสธและเขตยอมรับ H_0 ค่านี้จะขึ้นกับประเภทของการทดสอบ และอ่านได้จากตารางมาตรฐาน เช่น ค่า

วิกฤตของการแจกแจงแบบเอฟ(F) ระดับนัยสำคัญ α และตารางค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบที(t) ระดับนัยสำคัญ α

5. สรุปผลทดสอบ ถ้าค่าสถิติทดสอบอยู่ในเขตปฏิเสธ จะสรุปว่าปฏิเสธ H_0 (ยอมรับ H_1) แต่ถ้าค่าสถิติทดสอบอยู่นอกเขตปฏิเสธ จะสรุปว่ายอมรับ H_0 (ปฏิเสธ H_1)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งเรียกย่อๆว่า ANOVA เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป ซึ่งใช้กับงานวิจัยที่ต้องการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป และใช้สถิติทดสอบ F

ในการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มหลายๆกลุ่ม จะมีความแปรปรวนที่ต้องคำนวณ 2 ตัวคือ (ชูศรี วงศ์รัตน์, 2537)

- (1) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม จะเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึง ขนาดของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มต่างๆ ถ้าระหว่างกลุ่มมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันมากค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มจะมีค่ามากด้วย
- (2) ความแปรปรวนภายในกลุ่ม เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลแต่ละตัวที่รวบรวมมาได้ภายในแต่ละกลุ่มมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่า ความคลาดเคลื่อน

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูลแบบจำแนกทางเดียว (1 - WAY ANOVA)

(กัลยา วานิชย์บัญชา, 2539)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว เป็นการวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยพิจารณาจากปัจจัยหรือตัวแปรที่มีผลต่อข้อมูลเพียงปัจจัยเดียว ใช้สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรหรือกลุ่มที่ได้รับปัจจัยที่ต่างระดับกัน ตั้งแต่ 3 ระดับขึ้นไป โดยปัจจัยที่ทำให้ข้อมูลแตกต่างกันเรียกว่า ทรีทเมนต์(Treatment) ซึ่งหมายถึงวิธีการหรือลักษณะต่างๆ ที่ต้องการเปรียบเทียบ และข้อมูลที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบจะวัดได้จากหน่วยทดลอง นั่นคือการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว จึงเป็นการตรวจสอบว่า(ชูศรี วงศ์รัตน์, 2537)

ตัวแปรอิสระ 1 ตัว ซึ่งแบ่งออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆตั้งแต่ 3 ประเภทขึ้นไป ($K \geq 3$) จะส่งผลแตกต่างกันหรือไม่ (เปรียบเทียบ K ทริทเมนต์) และมีตัวแปรตาม 1 ตัว

เมื่อทำการเปรียบเทียบ K ทริทเมนต์ ลักษณะของข้อมูลที่ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวแสดงดังตารางที่ ค1

ตารางที่ ค1 ลักษณะข้อมูลที่ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว

(กัลยา วานิชย์บัญชา, 2539)

ทริทเมนต์						
1	2	3	.	.	.	k
X_{11}	X_{21}	X_{31}	.	.	.	X_{k1}
X_{12}	X_{22}	X_{32}	.	.	.	X_{k2}
.
X_{1n1}	X_{2n2}	X_{3n3}	.	.	.	$X_{k,nk}$
n_1	n_2	n_3	.	.	.	n_k
T_1	T_2	T_3	.	.	.	T_k
\bar{X}_1	\bar{X}_2	\bar{X}_3	.	.	.	\bar{X}_k

ให้ k = จำนวนทริทเมนต์

X_{ij} = ข้อมูลของหน่วยทดลองที่ j ในทริทเมนต์ที่ i

$i = 1, 2, 3, \dots, k$

$j = 1, 2, 3, \dots, n_i$

n = จำนวนหน่วยตัวอย่างหรือหน่วยทดลองทั้งหมด

$\sum \sum X_{ij}$ = ผลรวมของข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด

\bar{X} = ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

T_i = ผลรวมของข้อมูลตัวอย่างชุดที่ i

สูตรอย่างง่ายในการคำนวณสำหรับตาราง ANOVA แบบมีปัจจัยเดียว

(กัลยา วานิชย์บัญชา, 2539)

$$CM = (\sum T_i)^2/n$$

$$SST = \sum \sum X_{ij}^2 - CM$$

$$SSTrt = \sum T_i^2/n_i - CM$$

$$SSE = SST - SSTrt$$

$$MSE = SSE/(n-k)$$

$$MSTrt = SSTrt/(k-1)$$

เมื่อ SST = ผลบวกของความแปรปรวนทั้งหมด (Sum of Square Total) ที่มีองศาอิสระ (n-1)

SSTrt = ผลบวกความแปรปรวนระหว่างทรีทเมนต์ (Sum of Square for Treatment) ที่มีองศาอิสระ (k-1)

SSE = ความแปรปรวนภายในทรีทเมนต์เดียวกันหรือเรียกว่า ผลบวกของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Sum of Square for Error) ที่มีองศาอิสระ (n-k)

CM = Correction for Mean

MSE = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Square for Error)

MSTrt = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของทรีทเมนต์ (Mean Square for Treatment)

ตารางที่ ค2 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แบบมีปัจจัยเดียว (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2539)

แหล่งแปรปรวน	องศาอิสระ	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F
	DF	SS	MS = SS/DF	
ระหว่างทรีทเมนต์	k-1	SSTrt	MSTrt	$\frac{MSTrt}{MSE}$
ภายในทรีทเมนต์	n-k	SSE	MSE	
ผลรวม	n-1	SST		

ตารางที่ ค3 สมมติฐานของการทดสอบความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว

การทดสอบสมมติฐาน	สถิติทดสอบ
$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ $H_1: \text{มี } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ } i \neq j$ ($\mu =$ ค่าเฉลี่ยของประชากร)	$F = \frac{MSTrt}{MSE}$ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha; k-1; n-k}$

ขั้นตอนการทดสอบ

- (1) ตั้งสมมติฐาน H_0 และ H_1 ซึ่งมี 2 ลักษณะ ดังตารางที่ ค3
- (2) กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ α
- (3) คำนวณค่า F ดังตารางที่ ค2
- (4) หาค่า F จากตารางค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบเอฟ (F) โดยใช้ α ตามที่กำหนดไว้ในข้อ (2) และใช้ค่า $f_1 = k-1$ และ $f_2 = n-k$ ซึ่ง F จากตารางจะเขียนอยู่ในรูป $F_{\alpha; f_1; f_2}$
- (5) เปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับค่า F ที่ได้จากตาราง
- (6) สรุปผล(ชูศรี วงศ์รัตน์, 2537)

ถ้า F ที่คำนวณน้อยกว่า F ตารางจะยอมรับ H_0 สรุปได้ว่า ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยแต่ละประเภท(ทริทเมนต์) ให้ผลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ หรือแต่ละทริทเมนต์ของปัจจัย A ให้ผลคล้ายคลึงกัน

ถ้า F ที่คำนวณมากกว่าหรือเท่ากับ F ตาราง จะปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 สรุปได้ว่า มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งจะต้องทดสอบอีกครั้งหนึ่ง เพื่อหาว่าค่าเฉลี่ยคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน และแตกต่างกันอย่างไร

2. การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว ถ้าผลการวิเคราะห์พบว่า ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 และเนื่องจาก H_1 ตั้งค่าสมมติฐานว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่แตกต่างกัน และหาก

จะวิเคราะห์ต่อไปว่า ค่าเฉลี่ยของทริทเม้นต์นั้นต่างกันอย่างไร ซึ่งวิธี Least Significant Difference (LSD) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อวัดความแตกต่างของค่าเฉลี่ย มีขั้นตอนดังนี้

(1) ทำการทดสอบสมมติฐาน $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$

$$\text{ใช้สถิติทดสอบ } F = \frac{\text{MSTr}}{\text{MSE}}$$

ถ้ายอมรับ H_0 ไม่ต้องทำการทดลองต่อไปในขั้นที่ 2

ถ้าปฏิเสธ H_0 ต้องทำต่อขั้นที่ 2

(2) คำนวณหา LSD เพื่อเปรียบเทียบผลต่างระหว่าง μ_i และ μ_j โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ $= \alpha$

$$\text{LSD}_{\alpha} = t_{\alpha; n-k} \sqrt{\text{MSE} \left[\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right]}$$

$$\text{โดยที่ } n = \sum_{i=1}^k n_i$$

$n =$ จำนวนซ้ำ

ค่า t หาได้จากตารางค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบที (t) : องศาอิสระ ($\nu = n-k$) ; โดยใช้ค่า α ตามที่กำหนดไว้ในข้อ (2) ซึ่งค่า t จากตารางจะเขียนอยู่ในรูป $t_{\alpha; \nu}$

(3) คำนวณหา $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ ทุกค่า $i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, k$

(4) ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \geq \text{LSD}_{\alpha}$ หมายถึง μ_i จะแตกต่างจาก μ_j นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของทริทเม้นต์คู่่นั้นแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ α

8. การวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูลแบบจำแนกสองทาง (2 - WAY ANOVA)

เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง ค่าเฉลี่ยของ K ประชากร ($K \geq 3$) โดยมีตัวแปรอิสระ 2 ตัว และต้องการศึกษาว่าผลที่เกิดขึ้นอาจจะเนื่องจาก ตัวแปรอิสระ 2 ตัวประกอบกันหรือไม่ (ชูศรี วงศ์รัตนะ, 2537)

เมื่อมีตัวแปรหรือปัจจัย 2 ปัจจัย ที่มีอิทธิพลต่อข้อมูลที่เราต้องการวัด จะเรียกปัจจัยแรกว่า ปัจจัย A และเรียกปัจจัยที่สองว่า ปัจจัย B (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2539)

ตารางที่ ๓4 ลักษณะข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสองทาง
(กัลยา วานิชย์บัญชา, 2539)

ปัจจัย A	ปัจจัย B				ผลรวม
	1	2	...	b	
1	X_{111}, \dots, X_{11m}	X_{121}, \dots, X_{12m}	...	X_{1b1}, \dots, X_{1bm}	A_1
2	X_{211}, \dots, X_{21m}	X_{221}, \dots, X_{22m}	...	X_{2b1}, \dots, X_{2bm}	A_2
.
.
.
a	X_{a11}, \dots, X_{a1m}	X_{a21}, \dots, X_{a2m}	...	X_{ab1}, \dots, X_{abm}	A_a
ผลรวม	B_1	B_2	--	B_b	T

ให้ a = จำนวนระดับของปัจจัย A

b = จำนวนระดับของปัจจัย B

ab = จำนวนทริทเมนต์ (จำนวนระดับของอิทธิพลรวมของปัจจัย A และ B)

m = จำนวนข้อมูลในแต่ละทริทเมนต์

n = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

X_{ijk} = ข้อมูลตัวที่ k ที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A และระดับที่ j ของปัจจัย B

$i = 1, 2, \dots, a$

$j = 1, 2, \dots, b$

$k = 1, 2, \dots, m$

A_i = ผลรวมของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A

B_j = ผลรวมของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัย B

$(AB)_{ij}$ = ผลรวมของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A และระดับที่ j ของปัจจัย B

T = ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด

สูตรอย่างง่ายในการคำนวณสำหรับตาราง ANOVA แบบมีปัจจัย 2 ปัจจัย

(กัลยา วานิชย์บัญชา, 2539)

$$CM = \frac{T^2}{n}$$

$$SST = \sum \sum \sum X_{ijk}^2 - CM$$

$$SSA = \sum_{i=1}^a \frac{A_i^2}{bm} - CM$$

$$SSB = \sum_{j=1}^b \frac{B_j^2}{am} - CM$$

$$SSAB = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{(AB)_{ij}^2}{m} - CM - SSA - SSB$$

$$SSE = SST - SSA - SSB - SSAB$$

$$MSA = \frac{SSA}{a-1}$$

$$MSB = \frac{SSB}{b-1}$$

$$MSAB = \frac{SSAB}{(a-1)(b-1)}$$

$$MSE = \frac{SSE}{ab(m-1)}$$

เมื่อ SST = ผลบวกของความแปรปรวนทั้งหมด ที่มีองศาอิสระ $abm-1 = n-1$

SSA = ผลบวกของความแปรปรวนที่เกิดจากปัจจัย A ที่มีองศาอิสระ $(a-1)$

SSB = ผลบวกของความแปรปรวนที่เกิดจากปัจจัย B ที่มีองศาอิสระ $(b-1)$

SSAB = ผลบวกของความแปรปรวนที่เกิดจากอิทธิพลร่วมของปัจจัย A และ B ที่มีองศาอิสระ $(a-1)(b-1)$

SSE = ผลบวกของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง ที่มีองศาอิสระ $ab(m-1)$

MSA = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของปัจจัย A

MSB = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของปัจจัย B

MSAB = ค่าเฉลี่ยกำลังสองจากอิทธิพลรวมของปัจจัย A และปัจจัย B

MSE = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ ค5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) แบบมี 2 ปัจจัย(กัญชา วานิชย์บัญชา, 2539)

แหล่งแปรปรวน	องศาอิสระ(DF)	SS	MS = SS/DF	F
ปัจจัย A	a-1	SSA	MSA	$\frac{MSA}{MSE}$
ปัจจัย B	b-1	SSB	MSB	$\frac{MSB}{MSE}$
AB	(a-1)(b-1)	SSAB	MSAB	$\frac{MSAB}{MSE}$
ความคลาดเคลื่อน	ab(m-1)	SSE	MSE	
ผลรวม	abm-1	SST		

ตารางที่ ค6 สมมติฐานของการทดสอบความแปรปรวนแบบจำแนก 2 ทาง(กัญชา วานิชย์บัญชา, 2539)

การทดสอบสมมติฐาน	สถิติทดสอบ
1. H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยที่ 1 (A) H_1 : มีความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยที่ 1 อย่างน้อย 1 ระดับ	$F = \frac{MSA}{MSE}$ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha}$ ที่องศาอิสระ (a-1) และ ab(m-1)
2. H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยที่ 2 (B) H_1 : มีความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยที่ 2 อย่างน้อย 1 ระดับ	$F = \frac{MSB}{MSE}$ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha}$ ที่องศาอิสระ (b-1) และ ab(m-1)
3. H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างอิทธิพลรวมของทั้ง 2 ปัจจัย H_1 : มีความแตกต่างระหว่างอิทธิพลรวมของทั้ง 2 ปัจจัยอย่างน้อย 1 ทรีทเมนต์	$F = \frac{MSAB}{MSE}$ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha}$ ที่องศาอิสระ(a-1)(b-1) และ ab(m-1)

ขั้นตอนการทดสอบ

- (1) ตั้งสมมติฐาน H_0 และ H_1 ซึ่งมี 3 ลักษณะ ดังตารางที่ ค6
- (2) กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ α
- (3) กำหนดค่า F ดังตารางที่ ค5
- (4) หาค่า F จากตารางค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบเอฟ (F) โดยใช้ α ตามที่กำหนดไว้ในข้อ (2) และใช้ค่า f_1 และ f_2 ดังนี้

(4.1) การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทริทเมนต์ของปัจจัย A

$$f_1 = a-1 ; f_2 = ab(m-1)$$

(4.2) การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทริทเมนต์ของปัจจัย B

$$f_1 = b-1 ; f_2 = ab(m-1)$$

$$f_1 = (a-1)(b-1) ; f_2 = ab(m-1)$$

(4.3) การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทริทเมนต์ของปัจจัย A และของปัจจัย B

(5) เปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับค่า F ที่ได้จากตาราง

(6) สรุปผล(ซูกรี วงศ์รัตนะ, 2537)

(6.1) การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทริทเมนต์ของปัจจัย A

ถ้า F ที่คำนวณน้อยกว่า F ตารางจะยอมรับ H_0 สรุปได้ว่า ปัจจัย A ประเภท(ทริทเมนต์) ต่างๆ ให้ผลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ หรือแต่ละทริทเมนต์ของปัจจัย A ให้ผลคล้ายคลึงกัน

ถ้า F ที่คำนวณมากกว่าหรือเท่ากับ F ตาราง จะปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 สรุปได้ว่าแต่ละทริทเมนต์ของปัจจัย A ทำให้เกิดผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือให้ผลแตกต่างกันจริง

(6.2) การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทริทเมนต์ของปัจจัย B

ถ้า F ที่คำนวณน้อยกว่า F ตารางจะยอมรับ H_0 สรุปได้ว่า ปัจจัย B ประเภท(ทริทเมนต์) ต่างๆ ให้ผลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ หรือแต่ละทริทเมนต์ของปัจจัย B ให้ผลคล้ายคลึงกัน

ถ้า F ที่คำนวณมากกว่าหรือเท่ากับ F ตาราง จะปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 สรุปได้ว่าแต่ละทริทเมนต์ของปัจจัย B ทำให้เกิดผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือให้ผลแตกต่างกันจริง

(6.3) การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ของปัจจัย A และของปัจจัย B

ถ้า F ที่คำนวณน้อยกว่า F ตารางจะยอมรับ H_0 สรุปได้ว่า ปัจจัย A และ B ประเภท(ทรีทเมนต์)ต่างๆ ไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อผลการทดลอง นั่นคือถ้าพบว่าในกรณี (6.1) หรือ (6.2) กรณีใดกรณีหนึ่งหรือทั้ง 2 กรณี ให้ผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าผลที่แตกต่างกันนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากแต่ละทรีทเมนต์ของปัจจัย A หรือของปัจจัย B ทางใดทางหนึ่งโดยเฉพาะ

ถ้า F ที่คำนวณมากกว่าหรือเท่ากับ F ตาราง จะปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 สรุปได้ว่า ผลที่แตกต่างกันเกิดขึ้นเนื่องจาก แต่ละทรีทเมนต์ของปัจจัย A และ B ร่วมกัน ไม่ใช่เกิดขึ้นเนื่องจาก แต่ละทรีทเมนต์ของปัจจัยทางใดทางหนึ่งโดยเฉพาะ นั่นคือ เฉพาะทรีทเมนต์ของปัจจัย A หรือเฉพาะทรีทเมนต์ของปัจจัย B ไม่ทำให้เกิดผลแตกต่างกัน แต่ละทรีทเมนต์ของปัจจัยทั้ง 2 ร่วมกันทำให้เกิดผลแตกต่างกัน เรียกว่ามีปฏิสัมพันธ์(Interaction) ระหว่างแต่ละทรีทเมนต์ของปัจจัย A และ B (ชูศรี วงศ์รัตน์, 2537)

รายการอ้างอิง

กัลยา วาณิชย์บัญชา. 2539. การวิเคราะห์สถิติ: สถิติเพื่อการตัดสินใจ. พิมพ์ครั้งที่ 2.

กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชูศรี วงศ์รัตน์. 2537. เทคนิคการใช้สถิติเพื่อการวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร:

โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

อะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโทรสโคปี

(ศรณี โรจนอารยานนท์, 2530 กล่าวจาก Perkin-Elmer, 1980)

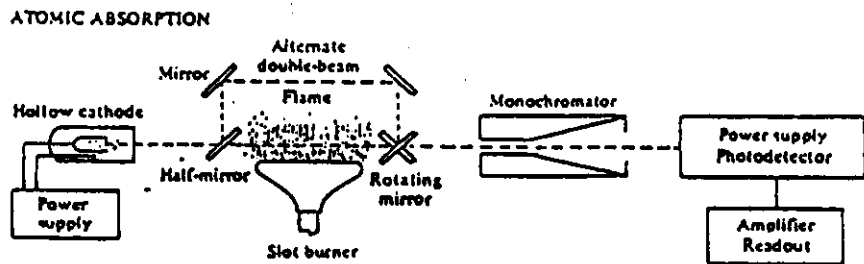
อะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโทรสโคปี เป็นการศึกษาถึงความสามารถของอะตอมในการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไวโอเลตหรือวิสิเบิล โดยการผ่านสารละลายเกลืออนินทรีย์เข้าไปในเปลวไฟที่ได้จากออกซิเจนและเชื้อเพลิงซึ่งทำหน้าที่อะตอมไม่จับตัวอย่างให้เป็นอะตอมอิสระที่เป็นไอ และอยู่ที่สภาวะพื้น(Ground State) เมื่อมีคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่เหมาะสมผ่านเข้าไปชนอะตอมอิสระที่เป็นไอและอยู่ที่สภาวะพื้น อะตอมนี้จะดูดกลืนปริมาณแสงไว้ ทำให้ปริมาณแสงผ่านเข้าไปในเครื่องวัดน้อยลง ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนไว้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของอะตอมนั้น หลักการนี้จึงนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้

เครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์(Atomic Absorption Spectrophotometer)

โดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ

1. แหล่งกำเนิดแสง(Light Source)
2. แหล่งกำเนิดอะตอม(Atomizer)
3. เครื่องแยกแสง(Monochromator)
4. ระบบวัดแสง(Photo Detector)
5. อุปกรณ์วัดค่า(Readout Device)

ดังแสดงในรูปที่ ง1



รูปที่ ง1 แผนผังแสดงเทคนิคการวัดโดยอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

ประกอบด้วย hallow cathode lamp ซึ่งแอโนดเป็นทั้งสแตน ส่วนแคโทดทำหรือบุด้วย ไอออนโลหะหรือโลหะผสมของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ เป็นรูปทรงกระบอก ขั้วทั้งสองบรรจุในหลอดแก้วปิดสนิทภายในบรรจุด้วยก๊าซเฉื่อย ได้แก่ แก๊สนีออนหรืออาร์กอน เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า กร่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้สูงพอ แคทไอออนจากแก๊สเฉื่อย (Ar^+ หรือ Ne^+) ที่ได้จากการทำให้แตกตัว เป็นไอออนก็จะมีพลังงานมากพอ ทำให้อะตอมโลหะหลุดจากผิวแอโนดให้กลุ่มอะตอมอิสระ ไอออนของโลหะนี้จะอยู่ในสภาวะเร้าไม่เสถียร จะคายคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะออกมา ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับการดูดกลืนของธาตุที่ต้องการ

2. แหล่งกำเนิดอะตอม (Atomizer)

เป็นส่วนที่ทำให้ธาตุในสารประกอบตัวอย่างกลายเป็นไอหรืออะตอมอิสระ ประกอบด้วย เนบิวไลเซอร์ (Nebulizer) และตะเกียง (Burner) เมื่อผ่านของเหลวเข้าไปในเนบิวไลเซอร์ เกิดแอโรซอล (Aerosol) ภายในสเปรย์แชมเบอร์ และแอโรซอลผ่านเข้าสู่เปลวไฟมีชั้นตอนดังนี้

2.1 ตัวทำละลายระเหยออกเกิดอนุภาคเกลือของแข็งที่มีขนาดเล็ก

2.2 ของแข็งนี้ถูกเผาไหม้ละลายตัวเป็น โมเลกุล

2.3 โมเลกุลแตกตัวเกิดอะตอมหรือเรดิคัลที่เป็นกลาง ซึ่งอะตอมที่เป็นกลางทำหน้าที่ดูดกลืนคลื่นแสง

2.4 อะตอมที่เป็นกลางอาจเปลี่ยนไปสู่สภาวะเร้าหรือเกิดการไอออไนซ์ในเปลวไฟ

3. เครื่องแยกแสง (Monochromator)

ทำหน้าที่เลือกคลื่นแสงที่เหมาะสมเพียงความยาวคลื่นเดียว ที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ ธาตุที่ศึกษา ประกอบด้วย ช่องแสงเข้าเข้า, กระจกซึ่งทำหน้าที่ผลิตลำแสงในแนวขนาน, เกรตติง (Grating) เป็นวัตถุที่ใช้กระจายแสง, และวัตถุรวมแสง ทำหน้าที่รวมภาพ(คลื่นแสง) ที่เข้าสู่ช่องแสงเข้าไปตกบนฟิวราบ (Focus Plane) หรือออกสู่ช่องแสง (Exit Slit)

4. ระบบวัดคลื่นแสง (Photo Detector)

โดยการใช้หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tube) วัดความเข้มแสงที่เหลือจากการดูดกลืนแสง และขยายให้มีปริมาณมากขึ้น หลอดทวีคูณแสงนี้จะประกอบด้วย ไดโนด (dynode) ซึ่งคล้ายกับโฟโตทิวบ์ (โฟโตทิวบ์เป็นหลอดสูญญากาศ และมีขั้วแคโทดเป็นรูปทรงกระบอก ขั้วแอโนดเป็นเส้น) แต่อิเล็กทรอนิกส์ภายในเพิ่มจากปกติอีก 9 อัน ไดโนดหนึ่งได้รับศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกสูงกว่า

แคโทด 90 โวลต์ อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดถูกเร่งไปชนไดโอดตัวที่หนึ่ง เกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากออกมา และวิ่งไปชนไดโอดตัวที่สอง ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าไดโอดที่หนึ่ง 90 โวลต์ และเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้จนครบวงจร อิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าสู่แอโนดมีค่าถึง 10^6 ถึง 10^7 เท่าของของเดิม แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องขยายและวัดสัญญาณออกมา

5. อุปกรณ์อ่านวัดค่า(Readout Device)

เป็นเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าที่ได้จากหลอดทวีคูณแสง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มของแสง

รายการอ้างอิง

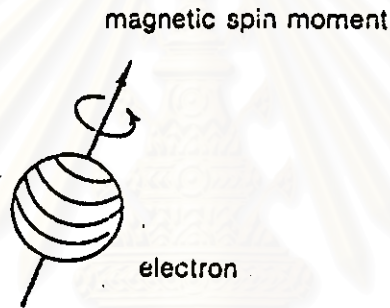
สุรภี โรจนอารยานนท์. 2530. การกำจัดไอทะหนักในน้ำเสีย(ห้องปฏิบัติการ)ด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

อิเล็กตรอน สปิน เรโซแนนซ์ สเปกโทรสโกปี
(คูติต เครื่องงาม และวิโรจน์ บุญโกสุมภ์, 2536)

จากวิชาทศศาสตรควอนตัม อะตอมประกอบด้วยอิเล็กตรอนและนิวเคลียส โดยอิเล็กตรอนจะวิ่งวนเป็นวงโคจรรอบๆนิวเคลียส และอิเล็กตรอนมีการหมุนรอบตัวเองด้วย (Goudsmit, 1925) การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า อิเล็กตรอน สปิน (electron spin) ดังแสดงในรูปที่ จ1



รูปที่ จ1 การเกิดสปินในอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน

การหมุนรอบตัวเองเช่นนี้ ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กขึ้น อาจแทนขนาดและทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กด้วยสัญลักษณ์เป็นลูกศรชี้ขึ้น ถ้าในวงโคจรหนึ่งมีอิเล็กตรอน 2 ตัว และสปินมีทิศทางตรงกันข้าม (อิเล็กตรอนตัวหนึ่งหมุนตามเข็มนาฬิกา และอีกตัวหนึ่งหมุนทวนเข็มนาฬิกา) โมเมนต์แม่เหล็กจะหักล้างกันกลายเป็นศูนย์ ในวงโคจรที่มีอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียวเรียกอิเล็กตรอนตัวนี้ว่า อิเล็กตรอนไร้คู่(Lone Pair Electron) และเรียกอะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ว่า ฟรีเรดิคัล(Free Radical) หรือ เรดิคัล ถ้ามีการป้อนสนามแม่เหล็กเข้าสู่วัสดุ เรดิคัล เหล่านี้ จะทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนไร้คู่ถูกแยกออกเป็น 2 ระดับ(เรียกว่าปรากฏการณ์ Zeeman) และในขณะที่เดียวกันถ้ายังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงาน (ev) เท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานดังกล่าว อิเล็กตรอนไร้คู่เหล่านั้นจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างดังกล่าวได้เป็นอย่างดี เรียกการดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอิเล็กตรอนไร้คู่เช่นนี้ว่า Electron Spin Resonance (ESR) ดังนั้นวัสดุจะดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ESR ได้นั้น ต้องมีอิเล็กตรอนไร้คู่เสมอ



วัสดุแม่เหล็ก

โดยทั่วไปวัสดุแม่เหล็กสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด ตามวิธีการเรียงตัวกันของสปินของอิเล็กตรอนดังแสดงในตารางที่ ๑1

ตารางที่ ๑1 การแบ่งชนิดของวัสดุแม่เหล็ก ตามลักษณะการเรียงตัวของสปินของอิเล็กตรอน

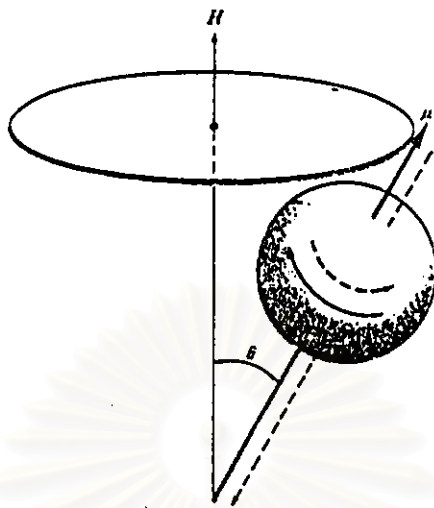
ชนิด	การเรียงของสปิน	Spontaneous Magnetization	วัสดุ
เฟอร์โรแมกเนติก	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	มี (แรง)	Fe, Co, Ni
แอนติเฟอร์โรแมกเนติก	↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑	ไม่มี (หักล้าง)	FeO, CoO, MnO
เฟอร์ริแมกเนติก	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓	มี (อ่อน)	MnFe ₂ O ₄ , ZnFe ₂ O ₄
พาราแมกเนติก	↗ ↘ ↙ ↘ ↗ ↖	ไม่มี (หักล้าง)	FeSO ₄
ไดอะแมกเนติก	ไม่มี สปิน		Bi, ZnF ₂

จากตาราง แมกเนติกโมเมนต์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศทางขนานกันดีที่สุด จึงเกิดอำนาจแม่เหล็กสูงที่สุด ดังนั้นสัญญาณ ESR จากเฟอร์โรแมกเนติก จึงมีค่าสูงกว่ากรณีแอนติและพาราแมกเนติกถึงกว่า 10³ เท่า ตัวอย่างวัสดุ YIG (Yttrium Iron Garnet) สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดีมาก ขณะเดียวกันภายใต้สนามแม่เหล็กสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้ดีอีกด้วย

ทฤษฎีหลักการของ ESR

1. เงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์(Resonance) กรณีอิเล็กตรอน 1 ตัว

อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคชนิดหนึ่งที่มีประจุไฟฟ้า $-e = -1.6022 \times 10^{-19}$ Coulomb และมีมวล $m = 9.1095 \times 10^{-31}$ kg เมื่อพิจารณากรณีที่มีอิเล็กตรอนอิสระโคจรเดี่ยวเพียง 1 ตัว อิเล็กตรอนตัวนี้คงมีการวิ่งไปมาอยู่ในสุญญากาศ และในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจะมีการหมุนรอบตัวเองด้วย ดังนั้นการหมุนรอบตัวเองทำให้อิเล็กตรอนมีแมกเนติกโมเมนต์ (μ_e) เป็นของตัวเอง และทิศทางแมกเนติกโมเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ ๑2



รูปที่ ๑๒ โมเมนต์แม่เหล็ก ของอิเล็กตรอนที่กำลังหมุนรอบตัวเอง

ขนาดของ magnetic moment (μ_e) ของอิเล็กตรอนเดี่ยว 1 ตัว มีค่าเท่ากับ

$$|\mu_e| = \frac{eh}{4\pi m} = \mu_B \quad (\text{หน่วยระบบ SI}) \quad (1)$$

โดยที่ μ_B มีชื่อเรียกเฉพาะว่า Bohr magneton เป็นหน่วยเล็กที่สุดของ magnetic moment h คือค่าคงที่ของ Planck = 6.6262×10^{-34} J.s

เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (1) จะได้ $\mu_B = 9.2741 \times 10^{-24}$ Joule/Tesla ดังนั้นจะเห็นว่า magnetic moment ของอิเล็กตรอน 1 ตัว มีค่าน้อยมาก แต่ในกรณีก้อนวัสดุแม่เหล็กซึ่งมีอะตอมจำนวน 10^{20} - 10^{23} ตัว-ลบ.ซม. จะสามารถแสดงแรงแม่เหล็กได้สูงมาก อย่างไรก็ตามอาจพิจารณาให้ μ_e เปรียบเสมือนก้อนแม่เหล็กเล็กๆก้อนหนึ่ง และถ้ามีสนามแม่เหล็ก H จากภายนอกกระทำ จะทำให้ μ_e หันทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็ก

ถ้าจะทบทวนกรณีเข็มทิศทำมุม θ กับสนามแม่เหล็กโลก พลังงานของเข็มทิศแม่เหล็กที่มี magnetization เท่ากับ M จะมีค่าดังนี้

$$E = -MH = -MHC\cos\theta \quad (2)$$

ถ้าเข็มทิศชี้ทิศเหนือ $\theta = 0$ จะเป็นกรณีเสถียรภาพที่สุด แต่ถ้า $\theta = 180^\circ$ จะเป็นสภาพไม่เสถียรที่สุด

กรณีโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนก็ในทำนองเดียวกันกับกรณีเข็มทิศ นั่นคือสำหรับอิเล็กตรอน จากทฤษฎีควอนตัม พลังงานของ μ_e จะถูกทำ quantized กล่าวคือ มีค่ากระโดดไม่ต่อเนื่อง และทิศทางของ μ_e จะมีเพียง 2 ทิศ นั่นคือ 1. ขนานชี้ทิศของ H หรือ 2. ขนานชี้ตรงข้ามทิศ

ของ H เมื่อนำแนวความคิดนี้ไปใช้กับสมการที่ (2) จะได้ค่าพลังงานของ magnetic moment ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กดังนี้

$$E = \mu_B H(2m_s) \quad (3)$$

โดยที่ m_s เรียกว่า ตัวเลขควอนตัมแม่เหล็ก (Magnetic Quantum Number) และมีค่า $-1/2$ หรือ $+1/2$ เท่านั้น

สมการ (3) นี้ชี้ให้เห็นว่า เมื่อมีสนามแม่เหล็ก H มากระทำกับอิเล็กตรอนเดี่ยว 1 ตัว จะทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนแตกตัวออกเป็น 2 ระดับ ซึ่งได้แก่ค่า $E = -\mu_B H$ และ $E = \mu_B H$ เท่านั้น หนึ่งเนื่องจาก m_s มีขนาดเท่ากับ $1/2$ เท่านั้น ดังนั้นเพื่อความสะดวก ถ้ากำหนดให้ S เป็น spin operator (หรือ spin) ที่มีขนาด $1/2$ ดังนั้นสามารถเขียนค่า μ_e ด้วยเทอมของ S ได้ว่า

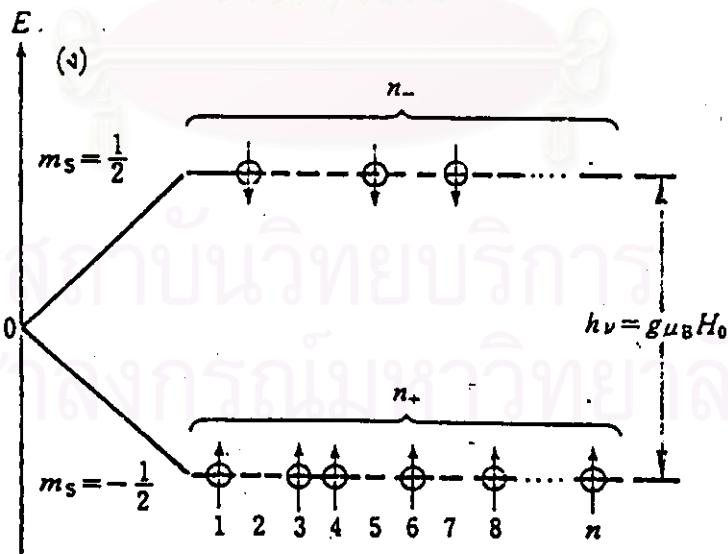
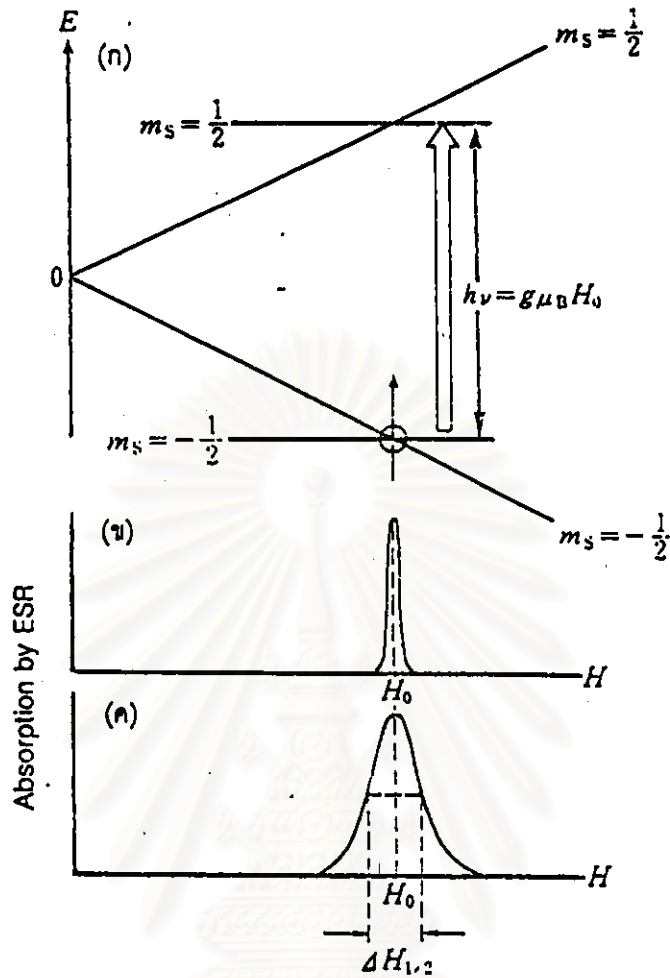
$$\mu_e = -2\mu_B S \quad (4)$$

ถ้าในหนึ่งอะตอมมีอิเล็กตรอนมากกว่า 1 ตัว สปินรวมจะมีค่าเท่ากับผลรวมของสปินแต่ละตัว และเมื่อแทนค่า $m_s = -1/2, +1/2$ (กรณีอิเล็กตรอน 1 ตัว) ลงในสมการที่ (3) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง E และ H ดังแสดงในรูปที่ ๑3 (ก) นั่นคือ การป้อนสนามแม่เหล็กกระทำกับอิเล็กตรอน จะทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนถูกแบ่งออกเป็น 2 ระดับ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Zeeman effect โดยปกติอิเล็กตรอนจะเลือกอยู่ในสถานะระดับที่เสถียรภาพคือ ระดับล่าง ซึ่ง $m_s = -1/2$ (μ_e ขนานชี้ทิศของ H) ในสภาพเช่นนี้ถ้าอิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่ ν เข้าสู่อิเล็กตรอน และถ้าพลังงาน $h\nu$ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีค่าเท่ากับ ผลต่างของระดับพลังงานทั้ง 2 นั่นคือ

$$h\nu = \mu_B H - (-\mu_B H) = 2\mu_B H \quad (5)$$

จะทำให้อิเล็กตรอน (ที่มี μ_e ขนานชี้ทิศของ H และมี $m_s = -1/2$) จูดคลื่น $h\nu$ และกระโดดขึ้นไปสู่ระดับที่สูงขึ้น (ซึ่งมี μ_e ขนานชี้ทิศตรงข้าม H และมี $m_s = 1/2$) ซึ่งได้เรียกปรากฏการณ์การจูดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นนี้ว่า Electron Spin Resonance (ESR)

โดยทั่วไปความถี่ ν ที่ทำให้เกิด ESR มักจะมีค่าในย่าน Ghz เช่นถ้า $\nu = 9$ Ghz จะทำให้ H ประมาณ 0.32 Tesla รูปที่ ๑3 (ข) แสดงสเปกตรัมการจูดคลื่นแบบ ESR แต่เนื่องจากในสภาพเป็นจริง อิเล็กตรอนมีการกระทำซึ่งกันและกันเอง และกับอนุภาคอื่นๆ และจากกฎ uncertainty ทำให้สเปกตรัมที่วัดได้แผ่กว้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ ๑3 (ค)



รูปที่ ๑๘ (ก) การแยกระดับพลังงานของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการมีสนามแม่เหล็กมากระทำ
 (ข) สเปกตรัมของ ESR
 (ค) การแผ่กว้างของสเปกตรัมของ ESR อันเนื่องมาจากกฎ uncertainty
 (ง) จำนวนของอิเล็กตรอนที่ระดับบน(n_-) และจำนวนของอิเล็กตรอนที่ระดับล่าง(n_+)

2. เงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์ กรณีอิเล็กตรอนหลายตัว

ในวัสดุจริงานั้น จะมีโมเลกุลอะตอมและอิเล็กตรอนจำนวนมากมาย และในวัสดุนั้น อิเล็กตรอนมีพฤติกรรมทั้งที่วิ่งวนรอบนิวเคลียส และหมุนรอบตัวเองด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เงื่อนไขการเกิด ESR ต้องเขียนเป็นรูปทั่วไปว่า

$$h\nu = g\mu_B H \quad (6)$$

$$\text{ทั้งนี้ } g = g_0 + \Delta g \quad (7)$$

ซึ่งหมายความว่า ในวัสดุทั่วไปนั้น สัมประสิทธิ์ในสมการที่ (5) จะไม่เท่ากับ 2 แต่จะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 2 แล้วแต่วัสดุ ค่า $\Delta g = 2.002316$ ซึ่งเป็นค่าของอิเล็กตรอนเดี่ยวแต่มีค่าจากทฤษฎีสัมพันธภาพประกอบด้วย

โดยทั่วไปจะวัด ESR ได้ในวัสดุที่มีอะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่อยู่จำนวนไม่น้อยกว่า 10^{10} ตัว ถ้าสมมติว่าขณะนี้มีอิเล็กตรอนไร้คู่อยู่จำนวน n ตัว ในสภาพที่มีสนามแม่เหล็กมากกระทำ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ระดับ และเนื่องจาก 2 ระดับนี้อยู่ไม่ห่างกันมากนัก ดังนั้นอิเล็กตรอน (สปินชี้ขึ้น) บางตัวในระดับล่างอาจจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในระดับบนก็ได้ สมมติให้ว่า n_+ คือจำนวนของอิเล็กตรอนที่ระดับล่าง และ n_- คือจำนวนของอิเล็กตรอนระดับบน ดังแสดงในรูป 3 (ง) ถ้าการกระจายเป็นไปตามกฎของ Boltzman จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$n_+ + n_- = n \quad (8)$$

$$\frac{n_+}{n_-} = \exp\left(-\frac{g\mu_B H}{KT}\right) \quad (9)$$

โดยที่ K คือค่าคงที่ของ Boltzman และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

จากสมการที่ (8) และ (9) สามารถคำนวณค่า n_+, n_- ได้ดังนี้

$$n_+ = \frac{n}{1 + \exp(-g\mu_B H / KT)} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{g\mu_B H}{KT}\right) n \quad (10)$$

$$n_- = \frac{n \times \exp(-g\mu_B H / KT)}{1 + \exp(-g\mu_B H / KT)} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{g\mu_B H}{KT}\right) n \quad (11)$$

ต่อจากสภาพเช่นนี้ ถ้าเราป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ ν เข้าวัสดุ และป้อนสนามแม่เหล็ก H ให้เกิด resonance จะทำให้อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานล่างดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และกระโดดขึ้นไปสู่ระดับบน และในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนที่ระดับบนจะ "คาย" คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกสู่ภายนอก และตนเองจะตกลงสู่ระดับล่างพร้อมๆ กันด้วย โดยทั่วไปเนื่องจากความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงสถานะทั้ง 2 แบบ มีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าสุทธิของการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงควรแปรผันตรงกับความแตกต่างของจำนวน n_+ และ n_- นั่นคือ

$$n_+ - n_- = ng \mu_B H / K T \quad (12)$$

ถ้าในขณะที่กำลังวัด ESR มี $T = 300 \text{ K}$, $H = 0.3 \text{ Tesla (= 3000 Gauss)}$ จะได้

$$\frac{n_+ - n_-}{n} = 0.0013 \quad (13)$$

ผลการประเมินนี้ชี้ให้เห็นว่า จากอิเล็กตรอนไร้คู่จำนวน 1000 ตัว จะมีส่วนประโยชน์ในการดูดกลืนเพียง 1 ตัว (ถ้าเปรียบเทียบกับ NMR นิวเคลียส 1 ล้านตัวจะมีส่วนในการดูดกลืนเพียง 2-3 ตัว)

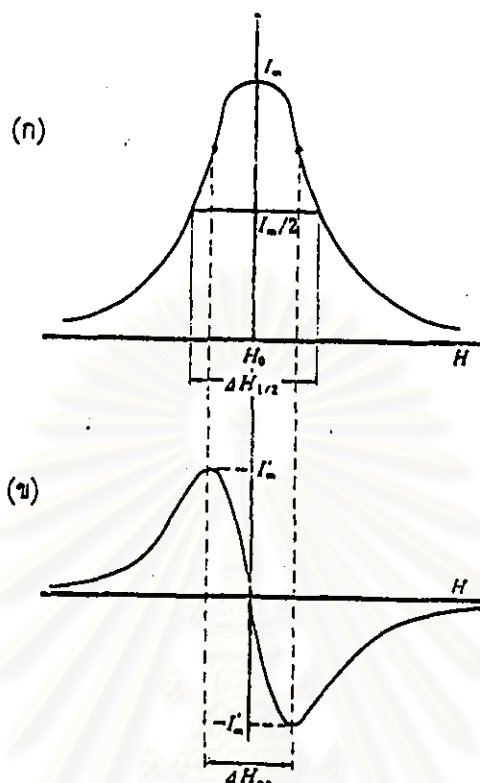
ในการวัด ESR อิเล็กตรอนที่ดูดกลืน $h\nu$ และกระโดดขึ้นสู่ระดับบนจะมีเวลาอายุอยู่ช่วงหนึ่ง (T_1 วินาที) แล้วจึงปล่อยพลังงาน $h\nu$ และตกลงระดับล่าง ดังนั้นในสภาพ steady state จะมีการดูดกลืนพลังงาน $h\nu$ อยู่อย่างต่อเนื่องได้ เวลา T_1 นี้เรียกว่า "spin lattice relaxation time" เป็นปริมาณที่เป็นเอกลักษณ์ของวัสดุและขึ้นกับอุณหภูมิ ข้อควรพิจารณาอีกข้อหนึ่งในกรณีวัสดุที่จะวัด ESR คือขนาดความกว้างของสเปกตรัม ESR เนื่องจากในวัสดุนั้นมีอิเล็กตรอนไร้คู่จำนวนมาก ทำให้อิเล็กตรอนแต่ละตัวมีโอกาสได้รับอิทธิพลจาก magnetic moment จากอิเล็กตรอนข้างเคียงได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สเปกตรัมของ ESR มีความกว้างกว่าอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ ๑3 (ค) และเรียกว่า $\Delta H_{1/2}$ ว่า line width

ข้อมูลที่ได้จาก ESR

ในการวัด ESR นั้นโดยทั่วไปจะใช้วิธียิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่คงที่ค่าหนึ่งเข้าสู่วัสดุ แล้ว scan หรือเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและจึงวัดปริมาณการดูดกลืนไมโครเวฟ ดังนั้นสเปกตรัม ESR แกนในแนวนอนคือ ความเข้มสนามแม่เหล็กและแกนในแนวตั้งคือ ปริมาณการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ(รูปภูเขา) แต่ในทางปฏิบัตินิยม plot กราฟรูป differential curve ดังแสดงในรูปที่ ๑4 (ข)

จากสเปกตรัม ESR ในรูปที่ ๑4 (ข) นี้ เราจะได้ข้อมูลสำคัญ เช่น

- (1) จากพื้นที่ใต้ curve จะได้จำนวนของอิเล็กตรอนไร้คู่ในวัสดุ
- (2) จากตำแหน่งของยอดของ curve จะได้ค่า g ของวัสดุ ซึ่งค่า g นี้จะบอกแหล่งที่มาว่าอิเล็กตรอนไร้คู่นั้นอยู่ที่ส่วนใดในอะตอม หรือ radical
- (3) จากค่า line width จะได้ข้อมูลเกี่ยวกับ interaction ของ spin ข้างเคียง ตลอดจนระยะห่างของ spin แต่ละตัว
- (4) จาก hyperfine structure (สเปกตรัมที่มี peak จำนวนมาก) จะได้ข้อมูลชนิดของธาตุหรืออะตอมที่อยู่ข้างเคียงว่าคืออะไร



รูปที่ ๑4 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟเป็นภูเขา

(ข) ผลการ differential จากรูป (ก) ซึ่งรูปนี้นิยมใช้เป็นสเปกตรัมของ ESR

เครื่องวัด ESR

เครื่องมือที่ใช้ในการวัด ESR ในงานวิจัยนี้เป็นระบบ JES ของบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น เครื่องมือนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญๆคือ

1. แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (เช่น gunn diode, crystron)
2. ขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าปรับค่าได้ (0-65,000 Gauss)
3. กล้องใส่ชิ้นงานที่จะวัด (cavity)
4. เครื่องวัดคลื่นไมโครเวฟ (homodyne crystal detection)
5. X-Y plotter
6. เครื่องคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนการวัด ESR

1. นำตะกอนเฟอร์ไรท์ 0.200 ± 0.001 กรัม ใส่ลงในหลอดควอทซ์(quartz) แล้ววางลงใน cavity ให้ถูกต้อง
2. ปลอ่ยคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่ cavity ด้วยความถี่ที่เหมาะสม
3. เปลี่ยนความเข้มของสนามแม่เหล็กจากช่วง 0.02 ถึง 0.82 Tesla พร้อมกับวัดการดูดกลืน ESR signal
4. สเปกตรัมที่ได้ แกนแนวนอนคือสนามแม่เหล็ก และแกนแนวตั้งคือสัญญาณแอมพลิจูดของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกดูดกลืนด้วยตะกอนเฟอร์ไรท์ พื้นที่ใต้กราฟคือจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่

รายการอ้างอิง

ดุสิต เครื่องงาม และวิโรจน์ บุญโกสุมภ์. 2536. การประยุกต์ใช้ ESR ในงานวัสดุศาสตร์. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี3(2): 111-140.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพาเคอร์

การวิเคราะห์โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพาเคอร์(X-ray power diffraction)

(สุรภี โรจน์อารยานนท์, 2530 กล่าวจาก Willard, Merrit และ Dean, 1980)

การเลี้ยวเบนของลำแสงรังสีเอกซ์จากผลึกเดี่ยว เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาโครงสร้างของสารและการจัดตัวของสาร เงื่อนไขการเลี้ยวเบนคลื่นรังสีเอกซ์บนผิวของผลึกจะเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) กล่าวคือ เมื่อลำแสงรังสีเอกซ์ชนผลึกที่ผิวและทำมุม θ อะตอมที่ผิวจะเลี้ยวเบนลำแสงนี้ ลำแสงที่ไม่ถูกเลี้ยวเบนจะผ่านเข้าสู่อะตอมที่อยู่ชั้นที่สองและเกิดการเลี้ยวเบน ส่วนที่เหลือผ่านเข้าสู่อะตอมชั้นที่สามและเกิดการเลี้ยวเบน ผลของการเลี้ยวเบนที่เกิดจากอะตอมที่อยู่ในแนวเดียวกันและมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่ากัน เป็นการเลี้ยวเบนของลำแสงคล้ายกับการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง โดยเกรตติงแบบสะท้อนแสง การเลี้ยวเบนของคลื่นแสงเกิดได้เมื่อ (1) ระยะห่างระหว่างชั้นอะตอมมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสง (2) ศูนย์กลางการเลี้ยวเบนทำหน้าที่การกระจายเหมือนกัน

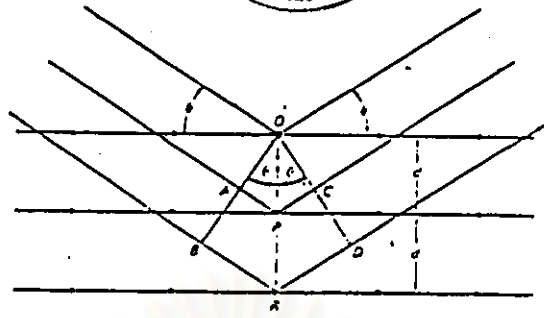
ในการศึกษาการเลี้ยวเบนของลำแสงรังสีเอกซ์โดยผลึก(Bragg, 1912) พบว่า ลำแสงช่วงความยาวคลื่นแคบๆชนผลึกที่มุม θ ดังรูปที่ ๑1 การเลี้ยวเบนจะเกิดขณะที่มีแรงดึงดูของคลื่นแสงกับอะตอมที่ตำแหน่ง O,P และ R การเลี้ยวเบนเกิดขึ้นได้เมื่อ n เป็นตัวเลขจำนวนเต็ม คลื่นแสงที่เลี้ยวเบนที่ OCD จะอยู่ในเฟสเดียว ผลึกจะทำหน้าที่สะท้อนคลื่นแสงรังสีเอกซ์ ดังนั้นจะได้

$$AP = PC = d \sin \theta$$

d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นผลึก เมื่อคลื่นแสงมีการแทรกสอดแบบเสริม(Constructive Interference)

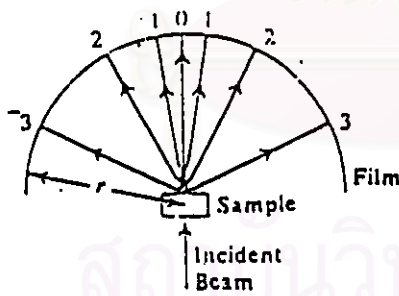
$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

สมการนี้เป็นสมการของแบรกก์ รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการสะท้อนจากผลึกจะเกิดเมื่อ มุมตกกระทบมีค่า $\sin \theta = n\lambda/2d$ ส่วนที่มุมอื่นจะเกิดการหักล้างกัน

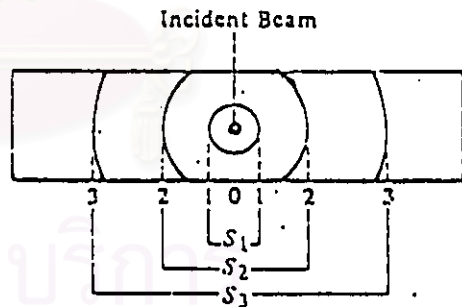


รูปที่ ๑1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลึก

สารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะต้องบดให้เป็นผงละเอียดขนาด 200 ถึง 300 เมช นำสารตัวอย่างไปวางบนแก้วบางๆ โดยนำไปวางทางเดินแสงแคบๆของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว และมีความยาวคลื่นพอๆกับระยะระหว่างอะตอมของผลึก เมื่อรังสีเอกซ์ชนผลึกจะเกิดการสะท้อนบริเวณผิวหน้าและชั้นถัดไปของอะตอม ที่จัดตัวอยู่อย่างเป็นระเบียบ ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของผลึกสารตัวอย่างดูได้จากฟิล์มถ่ายรูปที่จัดไว้ให้ตั้งฉากกับลำแสงที่ชน รูปวงกลมบนแผ่นฟิล์มเกิดจากเอกซเรย์ที่มีความยาวคลื่นเดียวชนอะตอมของผลึกที่อยู่บนชั้นต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่สะท้อนแสงเนื่องจากผลึกมีหลายระนาบจึงมีหลายมุม ภาพที่ได้จึงเป็นรูปกรวย แต่แผ่นฟิล์มบางมากจึงเห็นเป็นรูปวงกลมเมื่อหลังจากนำฟิล์มไปถ่ายรูป ดังแสดงในรูปที่ ๑2



(ก) การจัดเครื่องมือ



(ข) ฟิล์มที่ล้างเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ ๑2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อชนผลึกที่เป็นผง

จากรูปที่ ๑2 ตัวเลขเดียวกันที่อยู่ตรงข้ามกันแทนรูปกรวย r คือ รัศมีของฟิล์ม S คือ ระยะห่างระหว่างเส้นรอบวงของแต่ละรูปกรวย

แผ่นฟิล์มถูกจัดไว้เป็นรูปวงกลม(ครึ่งวงกลมหรือเต็มวงกลม) โดยมีสารตัวอย่างอยู่ตรงจุดศูนย์กลาง การจัดแบบนี้จะได้

$$4\theta = S / r$$

เมื่อ r คือรัศมีของฟิล์ม หน่วยเป็นมิลลิเมตร

S คือระยะห่างระหว่างภาพที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

θ คือมุมของการเลี้ยวเบน หน่วยเป็นเรเดียน

และ 1 เรเดียน เท่ากับ 57.296 องศา

ดังนั้น $4\theta = (S / r)(57.296)$

ปกติปรับ r ให้เป็นตัวคูณหรือตัวหารของ 57.296 ในการวัดมุม θ ทำให้ได้โดยปรับเส้นผ่าศูนย์กลางของกล้องมีค่า 57.296 มิลลิเมตร เพื่อให้รัศมีของกล้องมีค่า 28.65 มิลลิเมตร

จะได้ว่า $4\theta = (S)(57.296)/(57.296/2)$

ดังนั้น $S = 2\theta$

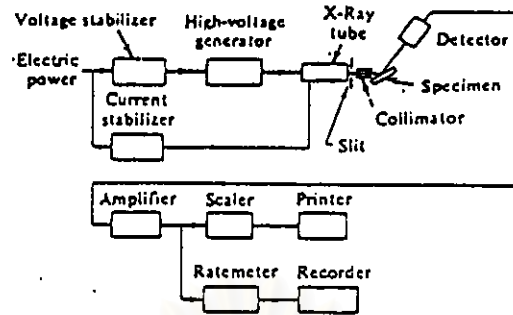
ข้อมูลที่ได้จาก XRD

ความเข้มและระยะห่างที่วัดได้จากฟิล์มที่เกิดจากการเลี้ยวเบน ใช้หาคุณภาพได้ เมื่อนำค่านี้ไปเปรียบเทียบกับความเข้มและระยะห่างของสเปกตรัมของสารมาตรฐานเพื่อหาระยะห่าง สำหรับแผ่นที่เก็บข้อมูลสารมาตรฐานมีการจัดเรียกลำดับตามความเข้มของเส้น การวิเคราะห์สารตัวอย่างต้องเปรียบเทียบความเข้มของเส้นต่างๆที่ได้กับความเข้มเส้นที่หนึ่ง สอง สาม และเส้นอื่นๆของสารมาตรฐาน

เครื่องรังสีเอกซ์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดแสง
 2. อุปกรณ์ที่ใช้จำกัดช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต้องการใช้
 3. ที่ใส่สารตัวอย่าง
 4. เครื่องวัดแสงหรือทรานส์ดิวเซอร์
 5. ระบบอ่านสัญญาณ
- ดังแสดงในรูปที่ ๓3



รูปที่ ๓ ส่วนประกอบของเครื่องรังสีเอกซ์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์โดยทั่วไป

ขั้นตอนการวัด XRD

1. นำตะกอนที่แห้งมาบดให้ละเอียดขนาด 200-300 เมช และผสมเข้าด้วยกัน
2. วางตะกอนลงบนแผ่นแก้ว กดทับด้วยแผ่นกระจกอีกแผ่นหนึ่งเพื่อให้ตะกอนถูกอัดเป็นฟิล์มบางๆ มีความสม่ำเสมอบนแผ่นแก้วนั้น
3. ปรับเงื่อนไขของเครื่อง X-ray Diffractometer
4. เปิดเครื่องโดยปรับ 2θ ตั้งแต่ 5 องศา ถึง 90 องศา จะได้ลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์(X-ray Diffraction Pattern) ที่แสดงคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารแม่เหล็กโดยมียอด 100% อยู่ที่ตำแหน่ง 2θ เป็น 35.4 องศา

รายการอ้างอิง

- สุรภี โรจน์อารยานนท์. 2530. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย(ห้องปฏิบัติการ)ด้วยกระบวนการเฟอไรไรต์. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุรรัตน์ ถมยาศิริกุล สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี
วิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2536
และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2537



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย