รายการอ้างอิง

[1] Marder, A.R. The metallurgy of zinc-coated steel. Progress in Materials Science 45 (2000) : 191-271.

[2] Kainuma, R., Ishida K. Reactive Diffusion between Solid Fe and Liquid Zn at 723K. ISIJ International 47 (2007) : 740-744.

[3] Vourlias, G., Pistofidis, N., Chrissafis, K., Pavlidou, E., Stergioudis, G. Mechanism and kinetics of the formation of zinc pack coatings. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 91 (2008) : 497–501

[4] Bicao, P., Jianhua, W., Xuping, S., Zhi, L., Fucheng, Y. Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing. Surface and Coatings Technology 202 (2008) : 1785-1788.

[5] Tang, N.Y. Control of Silicon Reactivity in General Galvanizing. Journal of Phase Equilibrium and Diffusion 29 (2008) : 337-344.

[6] Fratesi, R., Ruffini, N., Malavolta, M., Bellezze, T. Contemporary use of Ni and Bi in hot-dip galvanizing. Surface and Coatings Technology 157 (2002) : 34-39.

[7] Kozdras, M.S., Niessen, P. Silicon-induced destabilization of galvanized coatings in the sandelin peak region. Metallography 22 (1989) : 253-267.

[8] Reumont, G., Perrot, P., Foct, J. Thermodynamic study of the galvanizing process in a Zn–0.1%Ni bath. Journal of Materials Science 33 (1998) : 4759-4768.

[9] Ueda, S., Taguch, O., Iijima, Y., Takahashi, G., Yamaguchi, K. Growth kinetics of intermediate phase layers in an early stage of hot dip galvanizing at 450°C. Journal of Materials Science 43 (2008) : 5666-5668.

[10] Vourlias, G., Pistofidis, N., Stergioudis, G., Tsipas, D. The effect of alloying elements on the crystallization behavior and on the properties of galvanized coatings. Crystal Research and Technology 39 (2004) : 23-29.

[11] Shih, H.C., Hsu, J.W., Sun, C.N., Chung, S.C. The lifetime assessment of hot-dip 5% Al–Zn coatings in chloride environments. Surface and Coatings Technology 150 (2002) : 70-75.

[12] Pistofidis N., Vourlias, G., Konidaris, S., Pavlidou, El., Stergiou, A., Stergioudis, G. The effect of bismuth on the structure of zinc hot-dip galvanized coatings. Materials Letters 61 (2007) : 994-997.

[13] Pistofidis, N. The effect of preflux bath additives on the morphology and structure of the hot-dip galvanized coatings. Crystal Research and Technology 41 (2006) : 759-765.

[14] Boonyongmaneerat, Y., Saengkiettiyut, K., Rattanawaleedirojn, P., Angkaprasert, C., Wanichsampan, J., Saenapitak, S. Layer formation of hot-dip galvanized steels as influenced by NiCl2-base fluxes. Journal of Iron and Steel Research, International 17(8) (2010) : 74-78.

[15] Shibli, S.M.A., Manu, R. Process and performance improvement of hot dip zinc coating by dispersed nickel in the under layer. Surface and Coatings Technology 197 (2004) : 103-108.

[16] Chunshan, C., Jingtang, L., Gang, K., Qiaoyu, X., Runzhou, S. Influence of Ni-electrodeposited Pretreatment on Galvanized Coatings of Reactive Steels. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Editorial Board (2007) : 221-224.

[17] Anicai, L., Siteavu, M., Grunwald, E. Corrosion behaviour of zinc and zinc alloy depositions. Corrosion Prevention Control 39(4) (1992) : 89-93.

[18] Baldwin, K.R., Robinson, M.J., Smith, C.J.E. Corrosion rate measurements of electrodeposited zinc-nickel alloy coatings. Corrosion Science 36(7) (1994) : 1115-1131.

[19] Wilcox, G.D., Gabe, D.R. Electrodeposited zinc alloy coatings. Corrosion Science 35 (1993) : 1251-1258.

[20] มนัส สถิรจินดา. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

[21] Jordan, C.E., Marder, A.R. Fe-Zn phase formation in interstitial-free steels hot-dip galvanized at 450°C part I 0.00 wt% Al-Zn baths. Journal of Materials Science 32(21) (1997) : 5593-5602.

[22] Morgan, S.W.K. Zinc and its Alloys. 1st edition. London : Macdonald & Evans ltd., 1977.

[23] General Galvanizing Practice. London : Hot Dip Galvanizers Association,1965.

[24] อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน , 2544

[25] Norris, P., Allen, R. The Canning Handbook on Electroplating. 22nd edition. Birmingham : W.Canning Limited, 1982

[26] Gabe, D.R. Principles of metal surface treatment and protection. vol.28. International series on materials science & technology. New York : Pergamon press, 1978

[27] Fontana, M.G., Greene, N.D. Corrosion Engineering, New York : McGraw-Hill book company, 1967.

[28] Roberge, P.R. Corrosion Engineering Principles and Practice, New York : McGraw-Hill book company, 2008.

[29] El-Sherik, A.M., Erb, U., Page, J. Microstructural evolution in pulse plated nickel electrodeposits. Surface and Coatings Technology 88 (1996) : 70-78.

[30] Raghavan, V. Fe-Ni-Zn (Iron-Nickel-Zinc). Journal of Phase Equilibria 24 (2003) : 558

[31] Fuente, D., Castaño, J.G., Morcillo, M. Long-term atmospheric corrosion of zinc. Corrosion Science 49 (2007) : 1420-1436.

[32] Hamid, Z.A., Aal, A.A., Hassan, H.B., Shaaban, A. Process and performance of hot dip zinc coatings containing ZnO and Ni-P under layers as barrier protection. Applied Surface Science 256 (2010) : 4166-4170.

[33] Shibli, S.M.A., Manu, R., Dilimon, V.S. Effect of nickel-rich barrier layer on improvement of hot-dip zinc coating. Applied Surface Science 245 (2005) : 179-185.

[34] Bellezze, T., Malavolta, M., Quaranta, A., Ruffini, N., Roventi, G. Corrosion behaviour in concrete of three differently galvanized steel bars. Cement and Concrete Composites 28 (2006) : 246-255.

[35] Bajat, J.B., Kacarevic-Popovic, Z., Miškovic-Stankovic, V.B., Maksimovic, M.D. Corrosion behaviour of epoxy coatings electrodeposited on galvanized steel and steel modified by Zn–Ni alloys. Progress in Organic Coatings 39 (2000) : 127-135.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณค่ากระแสยอดคลื่น (peak current valve) สำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์

ค่าประสิทธิผล (effective หรือ root mean square valve) คือค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าสลับที่ก่อให้เกิดผลทางความร้อนเท่ากับค่าแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรง โดยในที่นี้ต้องการคำนวนค่ากระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เพื่อให้เกิดผลทางความร้อนเท่ากับค่ากระแสต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง 0.1 A/cm^2 ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่ากระแสยอดคลื่นของไฟฟ้ากระแสพัลส์เพื่อให้เกิดผลเช่นเดียวกันจากสมการการคำนวณค่ากระแสยอดคลื่นดังนี้

$$I_p = \frac{I_{eff}}{\theta}$$

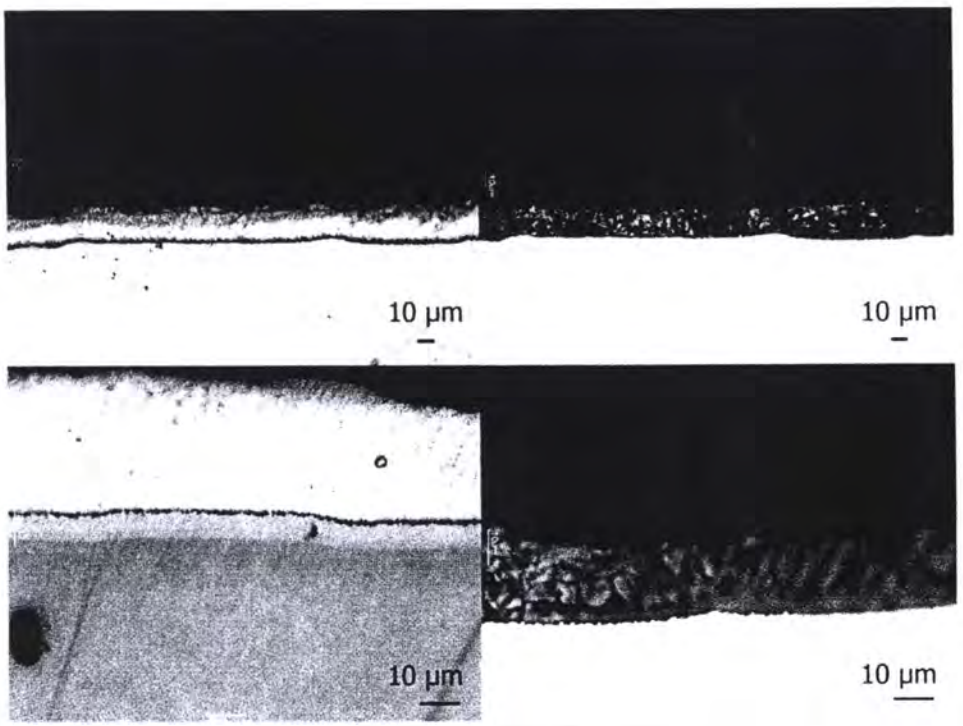
โดยที่ $\mathbf{I_{eff}}$ หมายถึงค่ากระแสประสิทธิผล (Effective current)โดยในที่นี้หมายถึงค่าไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง 0.1 A/cm^2

$\mathbf{I_p}$ หมายถึงค่ากระแสยอดคลื่น (peak current valve) หมายถึงค่าสูงสุดของรูปคลื่นกระแสพัลส์

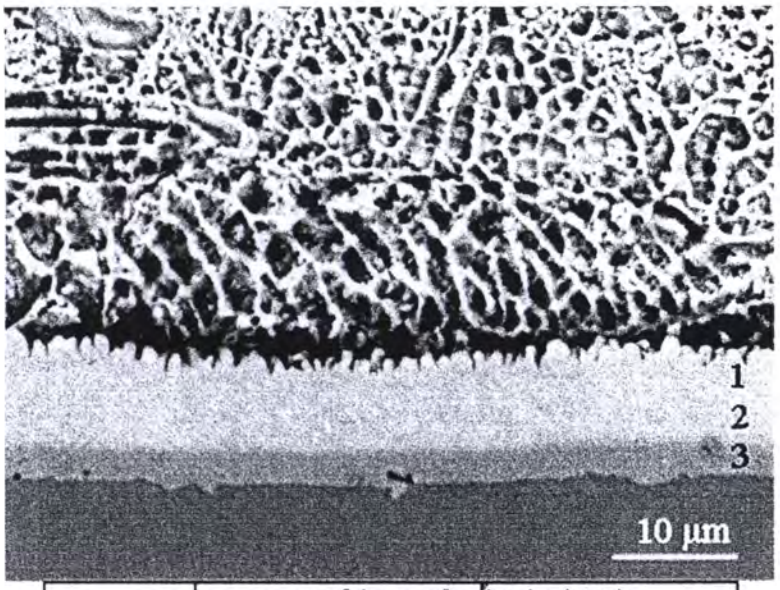
θ หมายถึง duty cycle โดยที่ $\theta = \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}}$ หรือสัดส่วนของระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อระยะเวลาทั้งหมดใน 1 รอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ การจ่ายไฟฟ้ากระแสพัลส์ใน 1 รอบมีรูปแบบการจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นเวลา 20 ms แล้วหยุดให้กระแส 3 ms ดังนั้นค่า duty cycle ที่ได้คือ 0.87

เมื่อแทนค่าข้อมูลลงในสมการการคำนวณค่ากระแสยอดคลื่นจะได้ $\mathbf{I_p}$ = 0.115 A/cm^2 ซึ่งเป็นค่ากระแสที่ใช้สำหรับการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์ในงานวิจัยนี้

ภาคผนวก ข

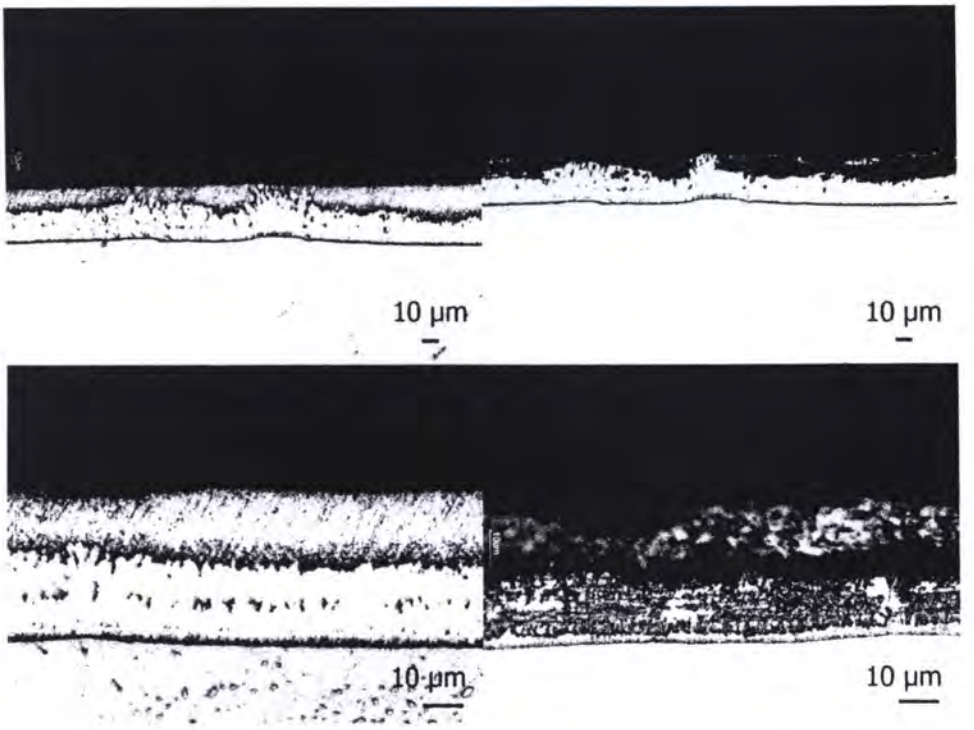


ภาพที่ ข.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-10s

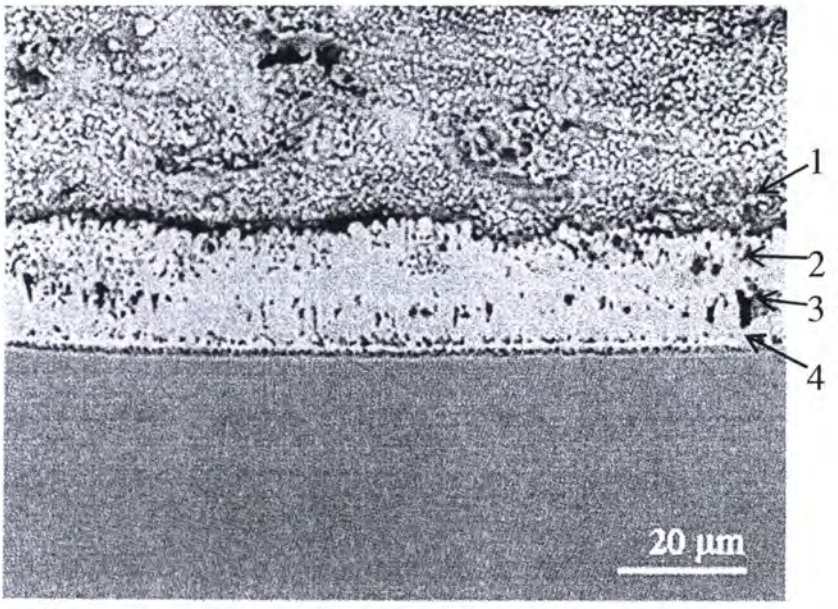


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	1.3	12.2	86.5	Γ+β
2	1.7	16.5	81.8	Γ
3	3.2	82.8	14.1	Ni

ภาพที่ ข.2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-10s

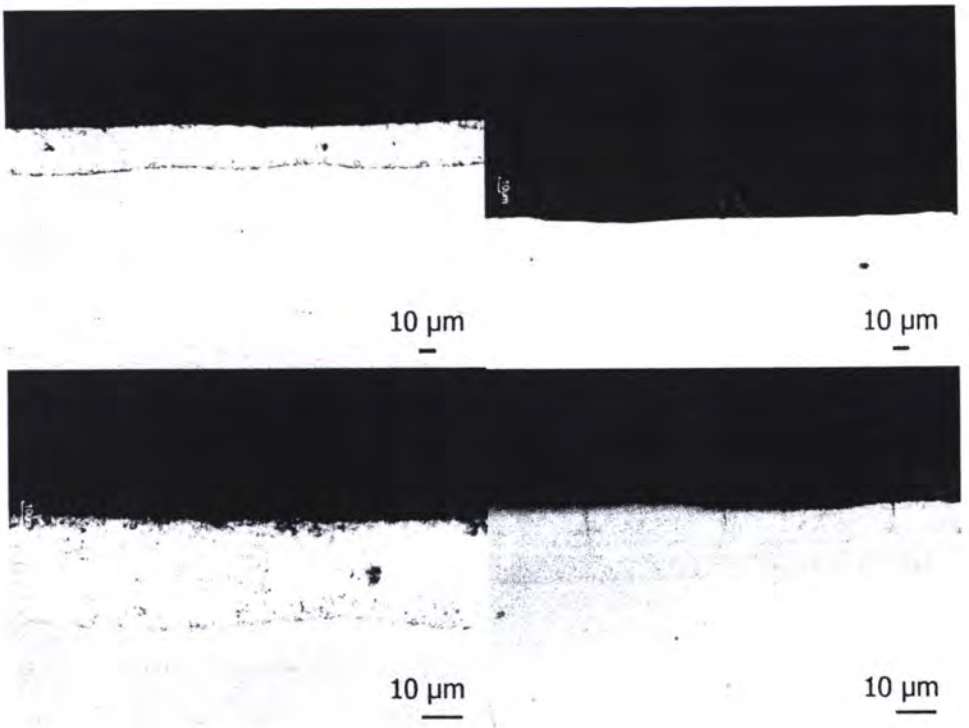


ภาพที่ ข.3 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H1-1m

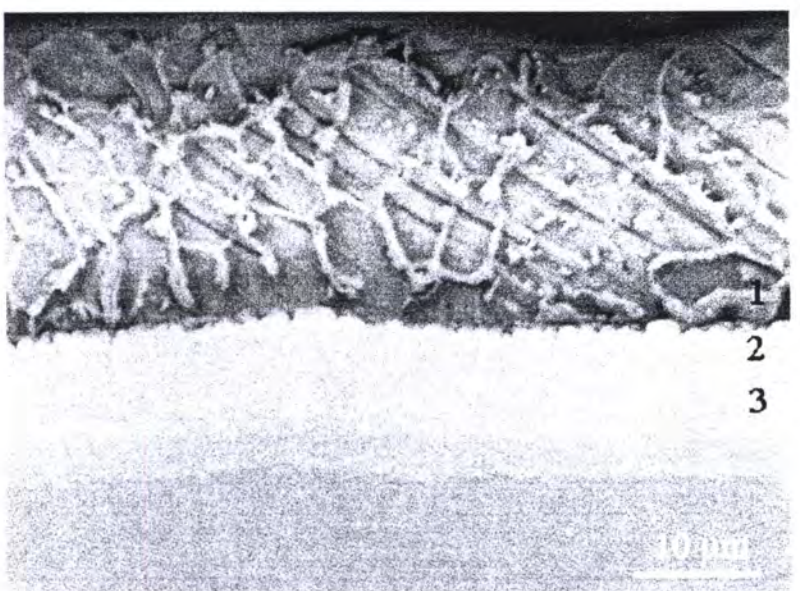


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0	0	100	Zn
2	7.6	0	92.4	δ+ζ
3	8.2	0	91.8	δ
4	9.9	0	90	δ

ภาพที่ ข.4 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H1-1m

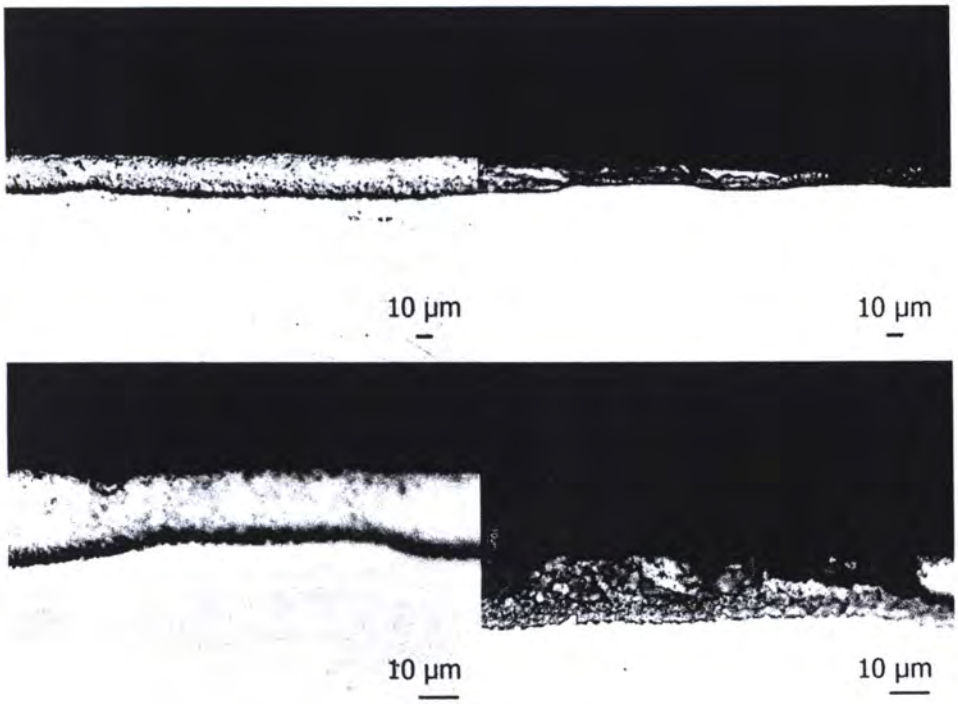


ภาพที่ ข.5 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-1m

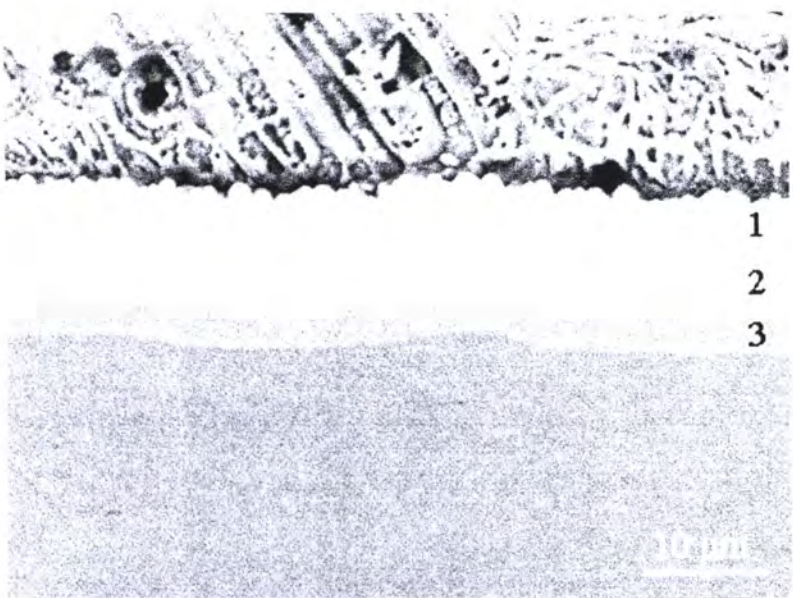


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0.5	3.1	96.1	Γ+β+Zn
2	1	13.1	85.9	Γ+β
3	1.4	18.9	79.6	Γ

ภาพที่ ข.6 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-1m

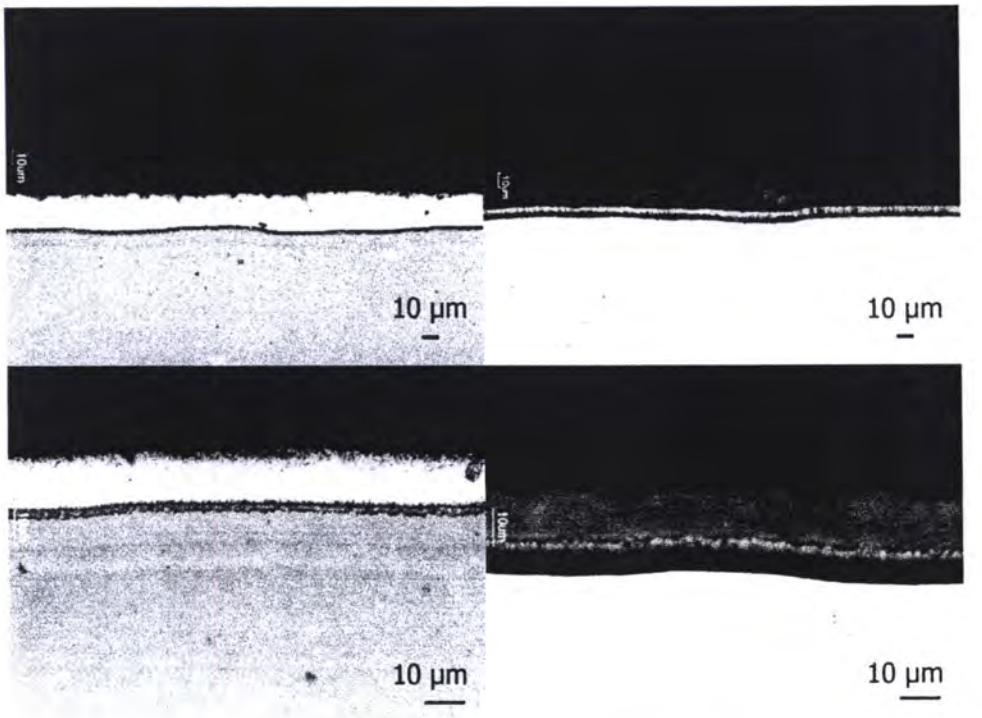


ภาพที่ ข.7 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H3-1m

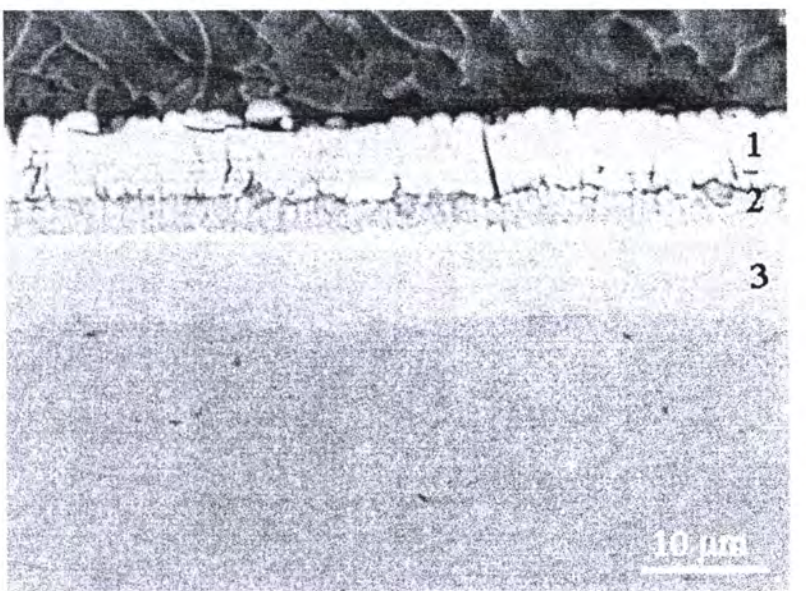


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0	12.3	87.7	Γ+β
2	1.6	16.8	81.7	Γ
3	3.2	93.1	3.8	Ni

ภาพที่ ข.8 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H3-1m

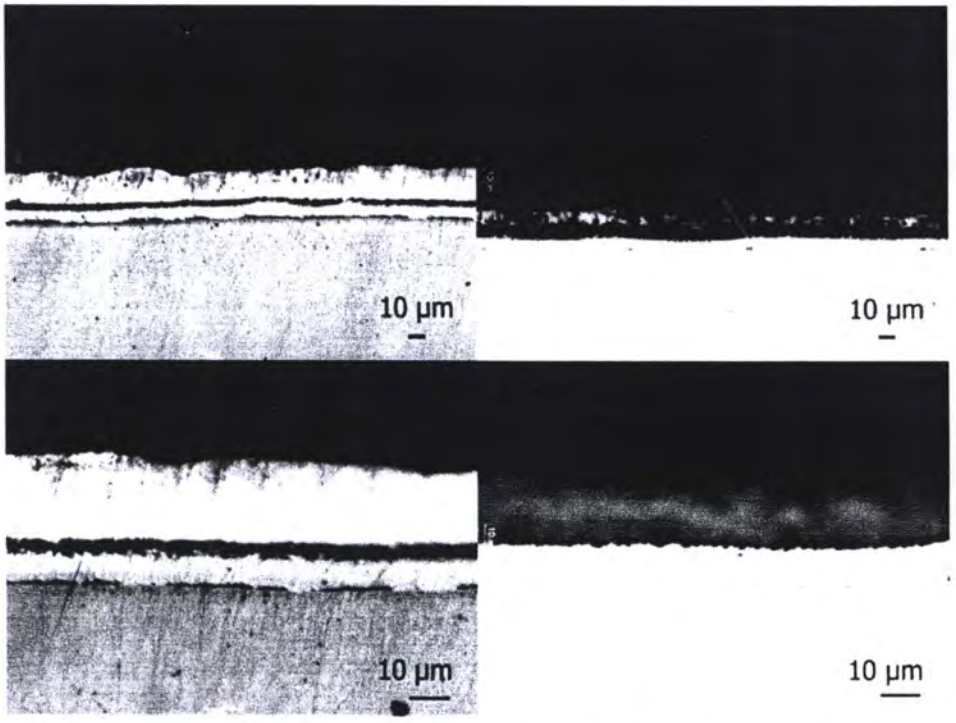


ภาพที่ ข.9 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H4-1m

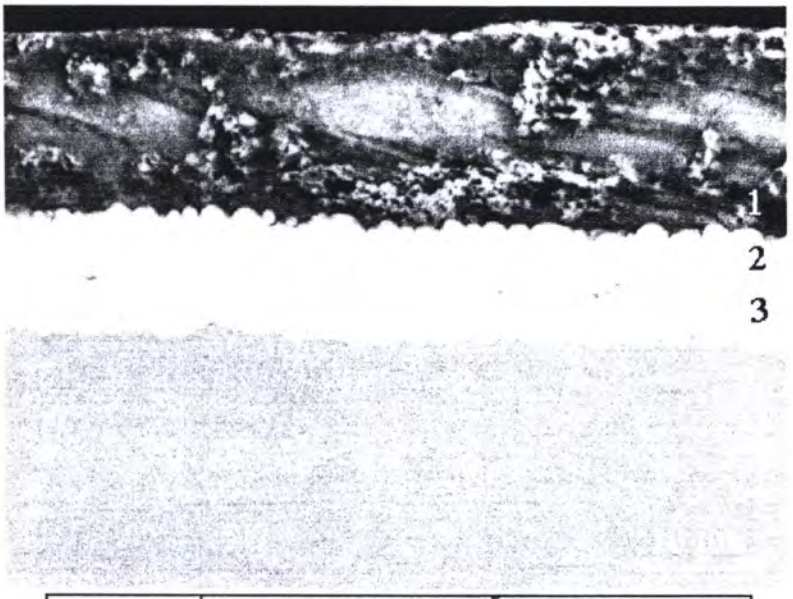


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0.8	14.5	84.8	Γ+β
2	1.2	24.4	74.4	Γ
3	2.2	96.2	1.6	Ni

ภาพที่ ข.10 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H4-1m

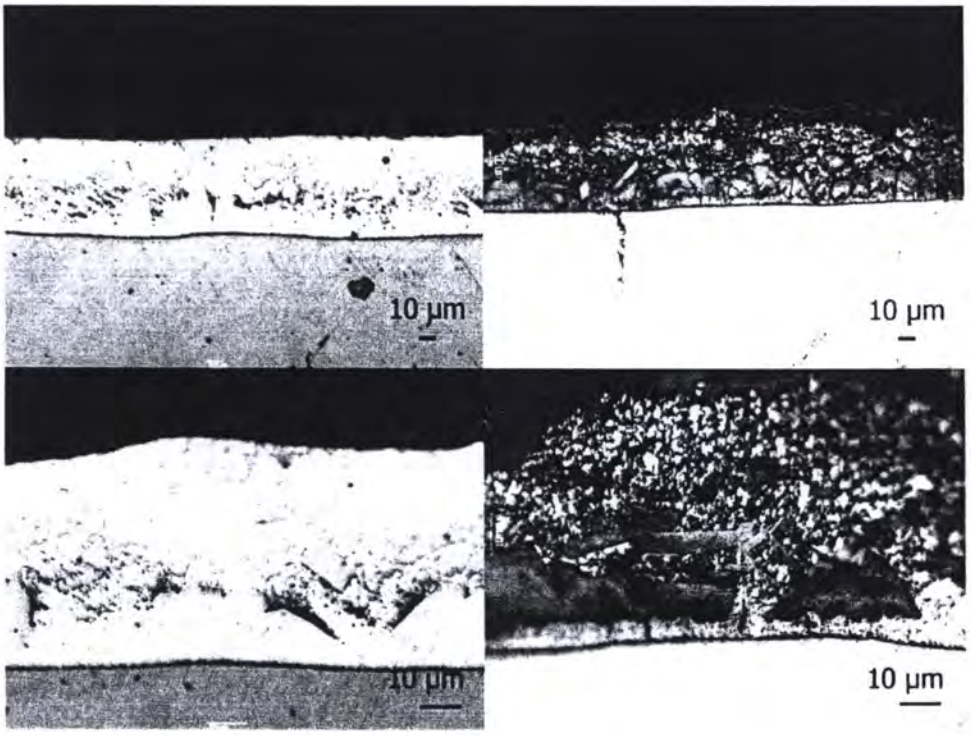


ภาพที่ ข.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-3m

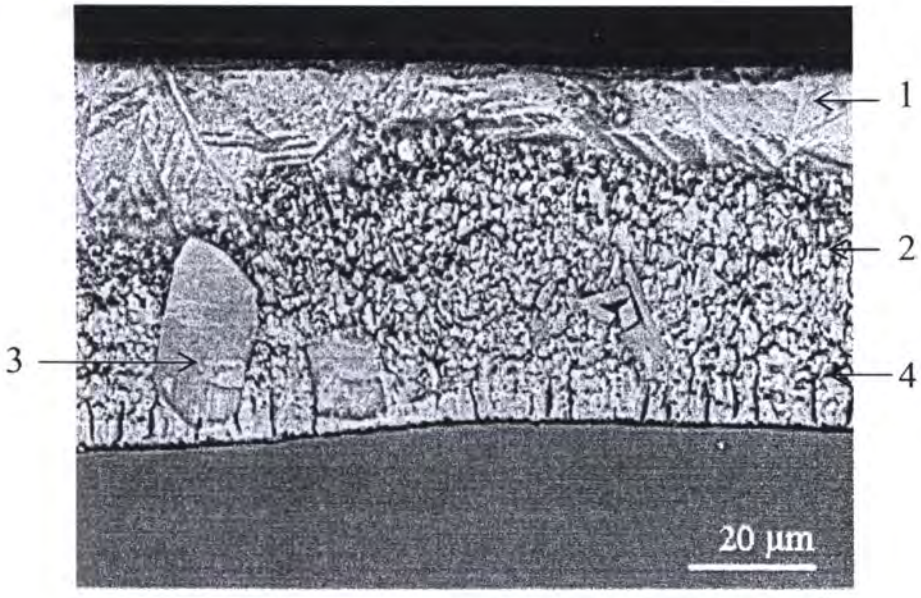


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	1.2	0.7	98.1	Γ_1+Zn
2	1.6	11.7	86.7	Γ+β
3	2.8	16.9	80.3	Γ

ภาพที่ ข.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-3m

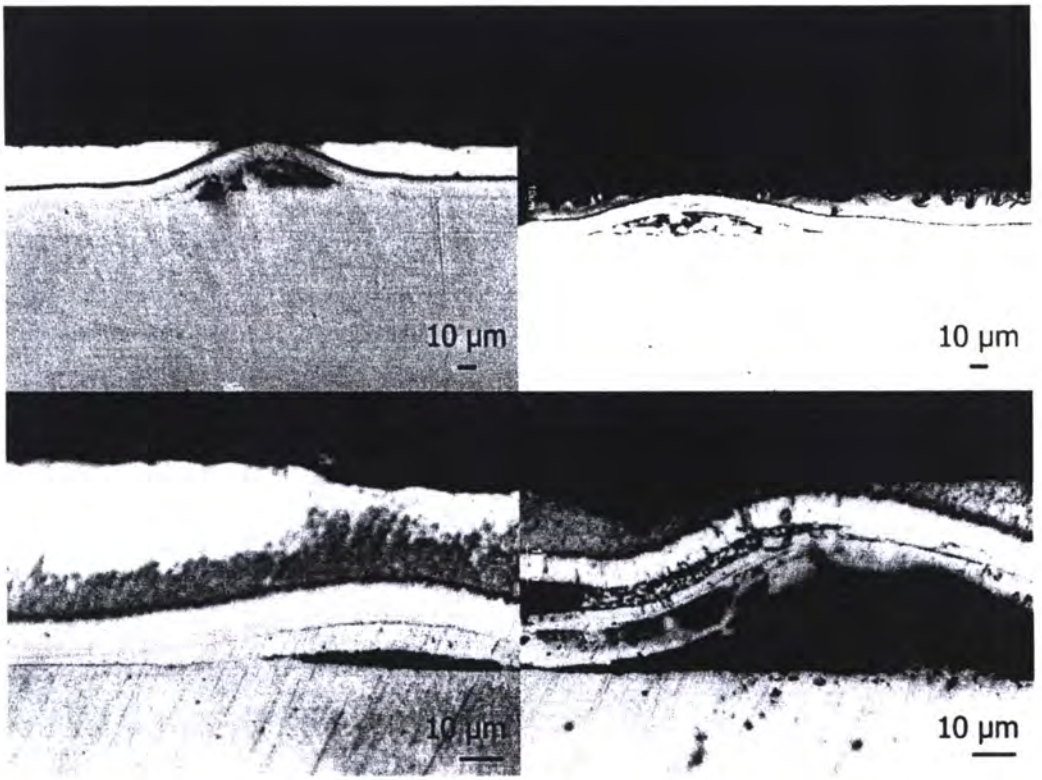


ภาพที่ ข.13 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-6m



ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0.2	0	99.1	Zn
2	6.3	0.8	93	ζ
3	7.7	0.5	91.8	δ+ζ
4	12.7	0	87.3	δ

ภาพที่ ข.14 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-3m



ภาพที่ ข.15 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1นาที

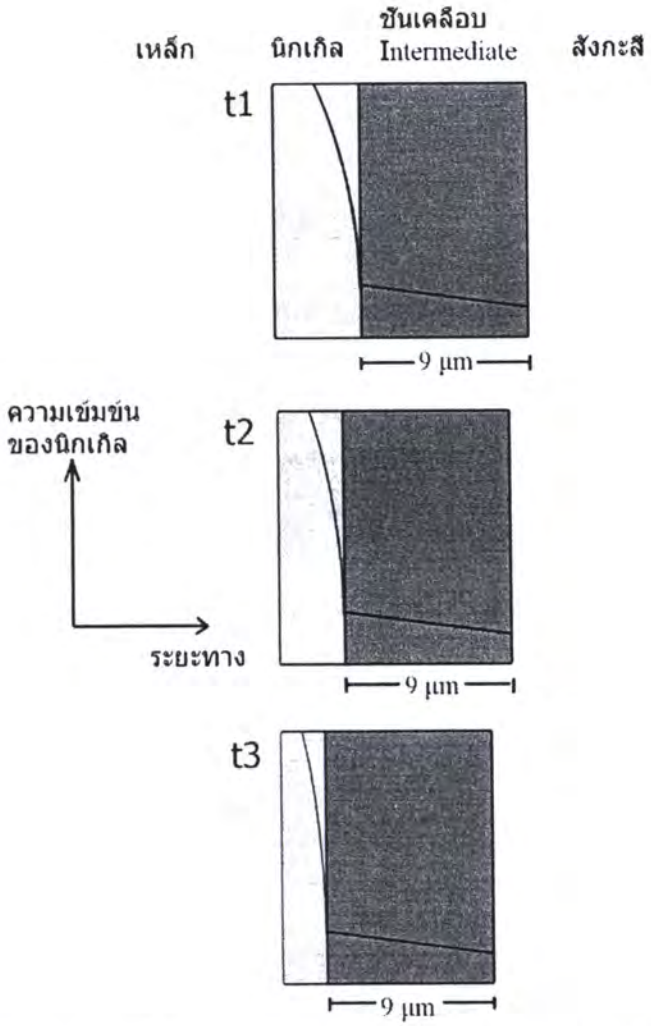
ภาคผนวก ค

จลน์ศาสตร์ในการแพร่ของเหล็ก,นิกเกิลและสังกะสี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในส่วนของชั้นเคลือบ intermediate ดังที่แสดงไว้แล้วในตารางที่ 4.3 พบว่าชั้นเคลือบ intermediate I และ II ต่างก็ประกอบด้วยนิกเกิลและสังกะสีเป็นส่วนใหญ่คือมีนิกเกิลเป็นธาตุประกอบประมาณ 20 และ 13 at% ตามลำดับ จึงอาจประมาณได้ว่าการแพร่เกิดขึ้นระหว่างรองพื้นนิกเกิลและสังกะสีหลอมเหลวเท่านั้น ในการศึกษาการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการจุ่มร้อนและเปรียบเทียบความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นเคลือบ intermediate นี้จะเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อถูกจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาทีและมีความหนาคงที่ประมาณ 9 μm ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการจุ่มร้อนความหนาของชั้นเคลือบนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงแต่ในทางตรงกันข้ามชั้นรองพื้นนิกเกิลจะเกิดการแพร่ออกไปและมีความหนาลดลงเรื่อยๆจนหมด จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถเสนอแบบจำลองการแพร่ของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่อาจเกิดขึ้นจริงได้ดังภาพที่ 4.16 โดยที่แบบจำลองการแพร่นี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิล (แกนตั้ง) และระยะทางในการแพร่ (แกนนอน) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า

t1 เป็นระยะเวลาที่เหล็กเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลถูกจุ่มร้อนจนกระทั่งชั้นเคลือบ intermediate เกิดการพัฒนาเข้าสู่สภาวะคงตัวและมีความหนาคงที่ เส้นโค้งในเฟสของชั้นรองพื้นนิกเกิลแสดงถึงเกรเดียนต์ของความเข้มข้นนิกเกิลที่ลดลงอย่างมากจาก 100 at% ลงมาถึงประมาณ 20 at% ของนิกเกิลที่บริเวณรอยต่อกับเฟส intermediate และในเฟสชั้นเคลือบ intermediate นี้ก็จะมีเส้นตรงที่มีความชันลดลง แสดงถึงเกรเดียนต์ของความเข้มข้นนิกเกิลที่ชั้นเคลือบนี้ในสภาวะคงตัวที่ซึ่งจะลดลงจากประมาณ 20 at% จนถึง 13 at% และในที่สุดนิกเกิลก็จะสามารถแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวภายนอกได้

เมื่อระยะเวลาในการจุ่มร้อนเพิ่มขึ้นเป็น t2 ชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความหนาที่ลดลง ในขณะที่ความหนาของชั้นเคลือบ intermediate ยังคงมีความหนาคงที่เท่าเดิมแต่อย่างไรก็ตามคาดว่าตำแหน่งของชั้นเคลือบมีการขยับไปทางซ้ายของแกนนอนมากขึ้น ในส่วนนี้มีสมมติฐานว่าบริเวณบางส่วนที่เคยเป็นเฟสของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่เวลา t1 นั้นการแพร่ของสังกะสีสามารถแพร่เข้ามาเกิดเป็นชั้นเคลือบ intermediate ที่เวลา t2 ได้ ในทำนองเดียวกันสำหรับบริเวณบางส่วนที่เคยเป็นชั้นเคลือบ intermediate ที่เวลา t1 ก็ได้เกิดการละลายออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวในเวลา t2 จึงทำให้ชั้นเคลือบ intermediate นั้นเสมือนว่าเกิดการขยับเลื่อนเข้าไปตามความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ลดลงและจะเกิดขึ้นเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาในการจุ่มร้อนเพิ่มขึ้นเป็น t3 จนกระทั่งชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ออกไปจนหมด



ภาพที่ ค.1 จำลองการแพร่ของชั้นรองนิกเกิลตามระยะเวลาในการจุ่มร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปจาก t1 ถึง t3

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ชื่อ – นามสกุล	นายรัญชน์ สงวนหมู่
วัน – เดือน – ปีเกิด	24 มีนาคม 2529
ที่อยู่	56/25 ซ.ติวานนท์ 30 ถ.ติวานนท์ ต.บางกระสอ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย นนทบุรี ปีการศึกษา 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2550
โทรศัพท์ติดต่อ	086-561-3824