

## รายการอ้างอิง



### ภาษาไทย

ปราโมทย์ เดชะอำไพ.ศ.ดร. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ปิยะบุตร พุกขานูบาล. การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ในสถานีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

### ภาษาอังกฤษ

Balanis, C.A. Advanced Engineering Electromagnetics. J. Wiley & Sons, 1989.

Becker, A.A. The Boundary Element Method in Engineering: A Complete course. London: McGraw-Hill, 1992.

El-Zafrany, Ali. Techniques of The Boundary Element Method. New York: Ellis horwood, 1993.

Feliziani, M. and Maradei, F. Fast computation of quasi-static magnetic fields around nonperfectly conductive shields. IEEE Trans. Magnetic.34 (September 1998): 2795-2798.

Grissom, C. Magnetic Spin effects in Radical Enzymatic Reaction. 1996.

Hasselgren, L. and Luomi, J. Geometrical aspects of magnetic shielding at extremely low frequency. IEEE Trans. Electromag. Compat.37 (August 1995): 409-419.

Haus, H.A. and Melcher, J.R. Electromagnetic Fields and Energy. New Jersey: Prentice Hall, 1989.

Hoburg, J.F. Principles of quasistatic magnetic shielding with cylindrical and spherical shields. IEEE Trans. Electromag. Compat.37 (November 1995): 574-579.

Krawczyk, A. and Tegopoulos, J.A. Numerical Modeling of Eddy Currents. Clarendon Press Oxford, 1993.

Kythe, P.K. An Introduction to Boundary Element Method. Boca Raton, FL : CRC Press, 1995.

Jin, J. The Finite Element Method in Electromagnetics. New York: J. Wiley & Sons, 1993.

Junyou, Y., Renyuan, T., Chengyuan, W., Meiwen, Z., and Yongbin, C. New Preventive Measures against Stray Fields of Heavy Current Carrying Conductors. IEEE Trans. Magnetics. 32 (May 1996): 1489-1492.

- LaMacchina, D. Study of Biological effects of Electromagnetic Radiation inconclusive. April 1992.
- Matthew, N.O. Sadiku. Numerical Techniques in Electromagnetics. U.S.A.: CRC Press, 1992.
- Pawluk, K. and Kucharska, M. Boundary-Integral Models of the Quasi-Stationary Field Computation in Electromagnetic Screens. IEEE Trans. Magnetics. 32 (May 1996): 840-843.
- Schulz, R.B., Plantz, V.C., and Brush, D.R. Shielding theory and practice. IEEE Trans. Electromag. Compat.30 (August 1988): 187-201.
- Scherer, W. Biological effects of Radiowave Transmission. March 1994.
- The Stewart Report. Mobile Phones and Health. IEGMP, Independent expert group on Mobile Phones. UK : 11 May 2000.
- Wakao, S. and Onuki, T. Electromagnetic field computations by the Hybrid FE-BE method using edge element. IEEE Trans. Magnetic.29 (March 1993): 1487-1490.
- Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. The Finite Element Method. London : McGraw-Hill, 1989.
- Zheng, D. and Davey, K. A Boundary Element Formulation For Thin Shell Problems. IEEE Trans. Magnetics. 32 (May 1996): 675-677.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

## เอกลักษณ์เวกเตอร์

กำหนดให้  $\vec{A}$  และ  $\vec{B}$  เป็นปริมาณเวกเตอร์ ในขณะที่  $U$  และ  $V$  เป็นปริมาณสเกลาร์ ดังนั้น

$$\nabla V(U + V) = \nabla U + \nabla V \quad (\text{ก.1})$$

$$\nabla(UV) = U \nabla V + V \nabla U \quad (\text{ก.2})$$

$$\nabla\left(\frac{U}{V}\right) = \frac{\nabla(UV) - U(\nabla V)}{V^2} \quad (\text{ก.3})$$

$$\nabla V^n = nV^{n-1}\nabla V \quad (n = \text{จำนวนเต็ม}) \quad (\text{ก.4})$$

$$\nabla(\vec{A} \cdot \vec{B}) = (\vec{A} \cdot \nabla)\vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{A} + \vec{A} \times (\nabla \times \vec{B}) + \vec{B} \times (\nabla \times \vec{A}) \quad (\text{ก.5})$$

$$\nabla \cdot (\vec{A} + \vec{B}) = \nabla \cdot \vec{A} + \nabla \cdot \vec{B} \quad (\text{ก.6})$$

$$\nabla \cdot (\vec{A} \times \vec{B}) = \vec{B} \cdot (\nabla \times \vec{A}) - \vec{A} \cdot (\nabla \times \vec{B}) \quad (\text{ก.7})$$

$$\nabla \cdot (\nabla \vec{A}) = \nabla \nabla \cdot \vec{A} + \vec{A} \cdot \nabla V \quad (\text{ก.8})$$

$$\nabla \cdot (\nabla V) = \nabla^2 V \quad (\text{ก.9})$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (\text{ก.10})$$

$$\nabla \times (\vec{A} + \vec{B}) = \nabla \times \vec{A} + \nabla \times \vec{B} \quad (\text{ก.11})$$

$$\nabla \times (\vec{A} \times \vec{B}) = \vec{A}(\nabla \cdot \vec{B}) - \vec{B}(\nabla \cdot \vec{A}) + (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{A} - (\vec{A} \cdot \nabla)\vec{B} \quad (\text{ก.12})$$

$$\nabla \times (V\vec{A}) = \nabla V \times \vec{A} + V(\nabla \times \vec{B}) \quad (\text{ก.13})$$

$$\nabla \times (\nabla V) = 0 \quad (\text{ก.14})$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (\text{ก.15})$$

ภาคผนวก ข.

การอินทิเกรตเชิงตัวเลขแบบเกาส์ควอดราเจอร์

### ข.1 เกาส์ควอดราเจอร์ 1 มิติ (One-Dimensional Gauss Quadrature)

$$I = \int_{-1}^1 f(\xi) d\xi \cong \sum_{i=1}^n w_i f(\xi_i) \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่  $n$  = จำนวนจุดเกาส์

$\xi_i$  = ตำแหน่งจุดเกาส์

$w_i$  = สัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก

ค่าเชิงตัวเลขของ  $\xi_i$  และ  $w_i$  มีค่าดังตารางที่ ข.1 สำหรับ  $n = 1, 2, 3, \dots, 12$

### ข.2 ลอการิทึมเกาส์ควอดราเจอร์ 1 มิติ (One-Dimensional Logarithmic Gauss Quadrature)

$$I = \int_0^1 \ln\left(\frac{1}{r}\right) f(\xi) d\xi \cong \sum_{i=1}^n w_i f(\xi_i) \quad (\text{ข.2})$$

ค่าเชิงตัวเลขของ  $\xi_i$  และ  $w_i$  มีค่าดังตารางที่ ข.2 สำหรับ  $n = 2, 3, \dots, 10$

### ข.3 เกาส์ควอดราเจอร์ 2 มิติ (Two-Dimensional Gauss Quadrature)

กรณีสี่เหลี่ยม

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) d\xi d\eta \cong \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_j) w_i w_j \quad (\text{ข.3})$$

ค่าเชิงตัวเลขของ  $\xi_i, \eta_j, w_i$  และ  $w_j$  มีค่าดังตารางที่ ข.1 สำหรับ  $n = 1, 2, 3, \dots, 12$

ตาราง ข.1

$\pm \xi_i$	$w_i$	$\pm \xi_i$	$w_i$
	<b>n=1</b>		<b>n=8</b>
0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.183434642495650	0.362683783378362
	<b>n=2</b>	0.525532409916329	0.313706645877887
0.577350269189626	1.0000000000000000	0.796666477413267	0.222381034453374
	<b>n=3</b>	0.960289856497536	0.101228536290376
0.0000000000000000	0.8888888888888888		<b>n=9</b>
0.774596669241483	0.5555555555555555	0.0000000000000000	0.330239355001260
	<b>n=4</b>	0.324253423403809	0.312347077040003
0.339981043584856	0.652145154862546	0.613371423700590	0.260610696402935
0.861136311594053	0.347854854137457	0.836031107326636	0.180648160694857
	<b>n=5</b>	0.968160239507626	0.081274388361576
0.0000000000000000	0.5688888888888889		<b>n=10</b>
0.538469310105683	0.478628670499366	0.148874338981361	0.295524224714753
0.906179845938664	0.236926885056189	0.433395394129247	0.269266719309996
	<b>n=6</b>	0.679409568299024	0.219086362515982
0.238619186083197	0.467913934572691	0.865063366688985	0.149451349150581
0.661209386466265	0.360761573048139	0.973906528517172	0.066671344308688
0.932469514203152	0.171324492379170		<b>n=12</b>
	<b>n=7</b>	0.125233408511469	0.249147045813403
0.0000000000000000	0.417959183673469	0.367831498998180	0.233492536538355
0.405845151377397	0.381830050505119	0.587317954286617	0.203617426723066
0.741531185599394	0.279705391489277	0.769902674194305	0.160078328543346
0.949107912342759	0.129484966168870	0.904117256370475	0.106939325995318
		0.981560634246719	0.047175336386512

ตาราง ข.2

$n$	$\xi_i$	$w_i$	$n$	$\xi_i$	$w_i$
2	0.11200880	0.71853931	8	0.13323243(-1)	0.16441660
	0.60227691	0.28146068		0.79750427(-1)	0.23752560
3	0.63890792(-1)	0.51340455	9	0.19787102	0.22684198
	0.36899706	0.39198004		0.35415398	0.17575408
	0.76688030	0.94615406(-1)		0.52945857	0.11292402
4	0.41448480(-1)	0.38346406	10	0.70181452	0.57872212(-1)
	0.24527491	0.38687532		0.84937932	0.20979074(-1)
	0.55616545	0.19043513		0.95332645	0.36864071(-2)
	0.84898239	0.39225487(-1)		0.10869338(-1)	0.14006846
5	0.29134472(-1)	0.29789346	10	0.64983682(-1)	0.20977224
	0.17397721	0.34977622		0.16222943	0.21142716
	0.41170251	0.23448829		0.29374996	0.17715622
	0.67731417	0.98930460(-1)		0.44663195	0.12779920
	0.89477136	0.18911552(-1)		0.60548172	0.78478879(-1)
6	0.216344005(-1)	0.23876366	10	0.75411017	0.39022490(-1)
	0.12958339	0.30828657		0.87726585	0.13865290(-1)
	0.31402045	0.24531742		0.96225056	0.24080402(-2)
	0.53865721	0.14200875		0.90425944(-2)	0.12095474
	0.75691533	0.55454622(-1)		0.53971054(-1)	0.18636310
	0.92266884	0.10168958(-1)		0.13531134	0.19566066
7	0.16719355(-1)	0.19616938	10	0.24705169	0.17357723
	0.10018568	0.27030264		0.38021171	0.13569597
	0.24629424	0.23968187		0.52379159	0.93647084(-1)
	0.43346349	0.16577577		0.66577472	0.55787938(-1)
	0.63235098	0.88943226(-1)		0.79419091	0.27159893(-1)
	0.81111862	0.33194304(-1)		0.89816102	0.95151992(-2)
	0.94084816	0.59327869(-2)		0.96884798	0.16381586(-2)

## ภาคผนวก ค.

## ตัวอย่างการคำนวณปัญหาศักย์เวกเตอร์ด้วยวิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์

จุดประสงค์ของภาคผนวกนี้จะเป็นการแสดงให้เห็นประสิทธิภาพและความแม่นยำของวิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์ในการนำมาหาผลเฉลยของปัญหาต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย

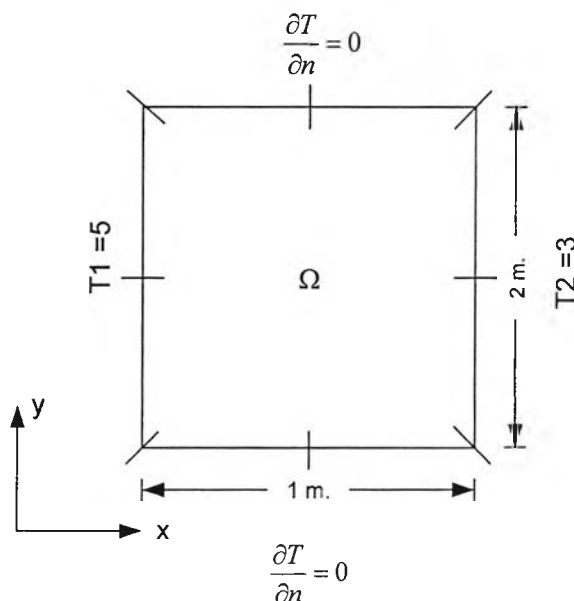
ตัวอย่างที่ 1. ปัญหาการนำความร้อน (heat conduction problem)

ตัวอย่างที่ 2. ปัญหาการไหลของความร้อน (heat flow problem)

## ตัวอย่างที่ 1. ปัญหาการนำความร้อน (Becker, 1992)

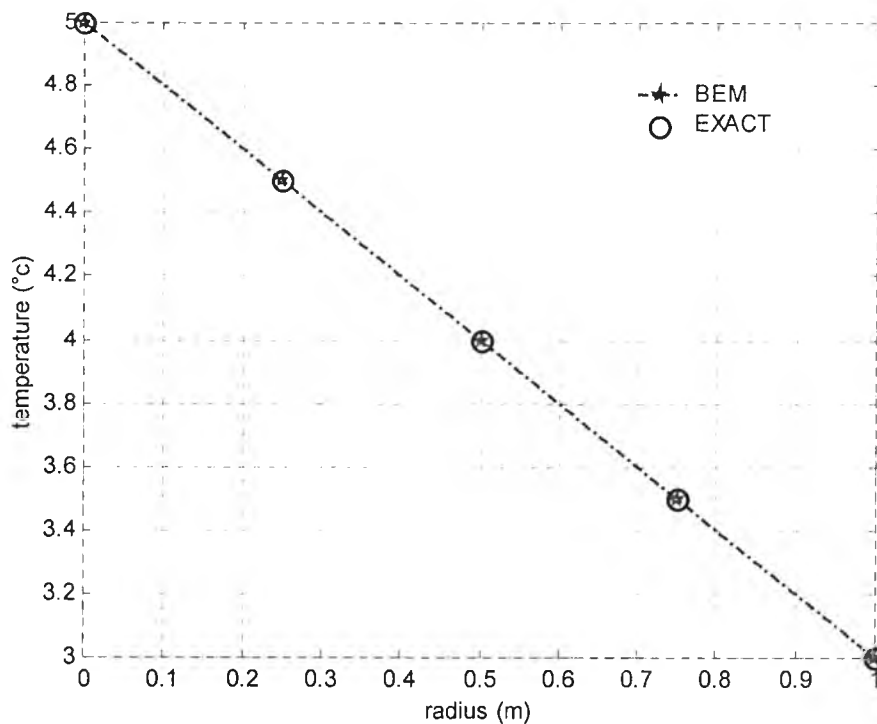
จุดประสงค์ของตัวอย่างนี้ คือ เป็นการทดสอบความถูกต้องของวิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์ในการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนแผ่นโลหะสี่เหลี่ยม โดยเทียบกับวิธีเชิงวิเคราะห์ โดยประมาณผลเฉลยคำตอบด้วยฟังก์ชันรูปร่างอันดับสอง

กำหนดให้แผ่นโลหะสี่เหลี่ยมมีขนาดความกว้าง 2 เมตร ยาว 1 เมตรและมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้  $T_1 = 5^{\circ}\text{C}$   $T_2 = 3^{\circ}\text{C}$   $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$  ดังรูป ค.1 ค่าสภาพนำไฟฟ้าเท่ากับ 2.5 S/m จำนวนอีลีเมนต์ที่ถูกแบ่งบนขอบเขตที่ต่อเนื่องของแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมเท่ากับ 8 อีลีเมนต์



รูปที่ ค.1 ลักษณะปัญหาการนำความร้อนบนแผ่นโลหะสี่เหลี่ยม





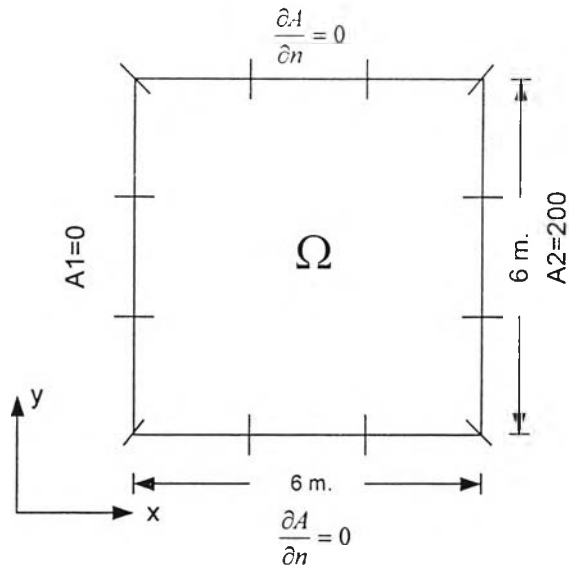
รูปที่ ค.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิระหว่างวิธีเชิงวิเคราะห์กับวิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์

จากรูปที่ ค.2 เป็นผลการคำนวณอุณหภูมิตามบนแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์และวิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากวิธีทั้งสอง ปรากฏว่าจะตรงกัน ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า วิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำสูงและเหมาะสมที่จะนำมาใช้หาผลเฉลยปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่บริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดลงในวิทยานิพนธ์นี้

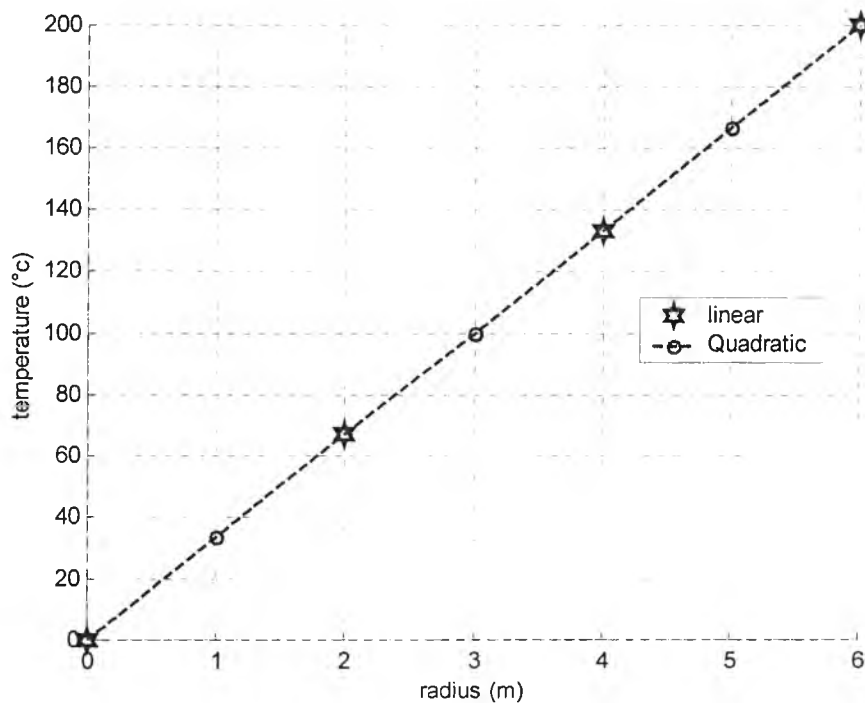
## ตัวอย่างที่ 2. ปัญหาการไหลของความร้อน (Kythe,1995)

จุดประสงค์ของตัวอย่างนี้ คือ จะเป็นการแสดงให้เห็นว่า การประมาณผลเฉลยคำตอบด้วยฟังก์ชันรูปร่างอันดับสอง (quadratic element) จะให้ผลเฉลยคำตอบที่มีความละเอียดมากกว่าการใช้ฟังก์ชันรูปร่างเชิงเส้น (linear element คือ ประมาณผลเฉลยคำตอบที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดปลายบนแต่ละอีลีเมนต์) ตัวอย่างที่นำมาแสดง คือ การคำนวณอุณหภูมิของปัญหาการไหลความร้อนบนแผ่นโลหะสี่เหลี่ยม

กำหนดให้แผ่นโลหะสี่เหลี่ยมมีขนาดความกว้าง 6 เมตร ยาว 6 เมตรและมีเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้  $A_1 = 0^\circ\text{C}$   $A_2 = 200^\circ\text{C}$   $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$  ดังรูปที่ ค.3 จำนวนอีลิเมนต์ที่ถูกแบ่งบนขอบเขตที่ต่อเนื่องของแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมเท่ากับ 12 อีลิเมนต์



รูปที่ ค.3 ลักษณะปัญหาการไหลของความร้อนบนแผ่นโลหะสี่เหลี่ยม



รูปที่ ค.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิระหว่างการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันชนิดเชิงเส้นกับฟังก์ชันรูปร่างอันดับสอง

จากรูป ก.4 เป็นผลการคำนวณของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนแผ่นโลหะที่เชื่อมด้วยวิธีบาวนด์ริ-  
อัสตีเมนต์ ซึ่งเปรียบเทียบการประมาณผลเฉลยคำตอบระหว่างฟังก์ชันเชิงเส้นกับฟังก์ชันรูปร่างอันดับ  
สอง ปรากฏว่าผลการคำนวณที่บนตำแหน่งโนดเดียวกันอุณหภูมิที่ได้จะมีค่าตรงกัน เช่นผลการ  
คำนวณที่ตำแหน่ง 0, 2 , 4 และ 6 เมตรตามลำดับ แต่การประมาณผลเฉลยคำตอบด้วยฟังก์ชันรูปร่าง  
อันดับสองจะให้ผลการคำนวณที่ตำแหน่ง 1, 3 และ 5 เมตรด้วย โดยตำแหน่งดังกล่าว คือ ตำแหน่งที่  
โนดกึ่งกลางบนแต่ละอัสตีเมนต์ จากตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าการประมาณผลเฉลยคำตอบด้วย  
ฟังก์ชันรูปร่างอันดับสองจะให้ผลการคำนวณที่ละเอียดกว่าฟังก์ชันเชิงเส้น





### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัชรัตน์ วิเชียรมงคลกุล เกิดวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2518 จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ในปีการศึกษา 2539 และระหว่างการศึกษได้เข้ารับการฝึกงานภาคฤดูร้อนที่บริษัทเทเลคอมเอเชียจำกัด (มหาชน) และเข้ารับการศึกษาคือในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540