



## รายการอ้างอิง

1. Comite Euro-International du Beton (CEB). Durable Concrete Structures. Bulletin d Information No. 183. London: Thomas Telford Services Ltd,1992
2. Neville, A.M. Properties of Concrete. 3rd ed. London: Longman,1981
3. Papadakis,V.G. ,Vayenas,C.G. ,and Fardis,M.N. Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete. ACI Materials Journal 88 (March-April 1991):186-196
4. Richardson,M.G. Carbonation of Reinforced Concrete :Its Causes and Management. Dublin: Citis Ltd,1988
5. Brodkey,R.S. ,and Hershey,H.C. Transport Phenomena (A Unified Approach). New York: Mc Graw-Hill Book Co.,1989
6. Tuutti,K. Corrosion of Steel in Concrete. CBI Research No. 4:82. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute,1982
7. Cahyadi, J.H. Effect of Environmental Relative Humidity on Carbonation of Concrete. Master's Thesis, University of Tokyo, 1992
8. Papadakis,V.G. ,Vayenas,C.G. ,and Fardis,M.N. Experimental Investigation and Mathematical Modeling of the Concrete Carbonation Problem. Chemical Engineering Science 46 No.5/6 (1991):1333-1338
9. Comite Euro-International du Beton. CEB-FIP Model Code 1990. Bulletin d' Information No. 203. Lausanne: CEB,1991
10. Papadakis,V.G. ,Vayenas,C.G. ,and Fardis,M.N. A Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation. AIChE Journal 35 (October 1989):1639-1650
11. Bakker,R. Initiation Period. In P. Schiessl (ed.), Corrosion of Steel in Concrete RILEM Report of the Tech. Com.60-CSC,pp. 22-55. London: Chapman and Hall Ltd,1988
12. Parrott,L.J. A Review of Carbonation in Reinforced Concrete. Cement and Concrete Association / Building Research Establishment, London, 1987
13. Comite Euro-International du Beton. Durability of Concrete Structures (State of the art report). Bulletin d' Information No.148. Paris: CEB,1982

14. Bazant, Z.P. Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures-Theory. Proceeding of the ASCE 105 (June 1979):1137-1153
15. Treadaway, K. Corrosion Period. In P. Schiessl (ed.), Corrosion of Steel in Concrete RILEM Report of the Tech. Com.60-CSC, pp. 56-69. London: Chapman and Hall Ltd, 1988
16. Fontana, M.G. Corrosion Engineering. 3rd ed. New York: Mc Graw-Hill Book Co., 1987
17. ACI Committee 222. Corrosion of Metals in Concrete. ACI Journal 82 (January-February 1985):3-32
18. Jones, D.A. Principles and Prevention of Corrosion. 2nd ed. New York: Macmillan Publishing Co., 1992
19. Escalante, E., and Ito, S. Measuring the Rate of Corrosion of Steel in Concrete. In N.S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting (eds.), Corrosion Rates of Steel in Concrete, pp. 86-102. Philadelphia: ASTM STP 1065, 1990
20. Gonzalez, J.A., Lopez, W., and Rodriguez, P. Effects of Moisture Availability on Corrosion Kinetics of Steel Embedded in Concrete. Corrosion 49 (December 1993):1004-1010
21. Gulikers, J. Influence of Local Repairs on Corrosion of Steel Reinforcement. Durability of Structures, pp. 151-156. IABSE Symposium Lisbon, 1989
22. Schiessl, P., Breit, W., and Raupach, M. Durability of Local Repair Measures on Concrete Structures Damaged by Reinforcement Corrosion. In V.M. Malhotra (ed.) Durability of Concrete, pp. 1195-1215. Detroit: ACI Sp-145, 1994
23. Andrade, C., Alonso, M.C., and Gonzalez, J.A. An Initial Effort to Use the Corrosion Rate Measurements for Estimating Rebar Durability. In N.S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting (eds.), Corrosion Rates of Steel in Concrete, pp. 29-37. Philadelphia: ASTM STP 1065, 1990
24. ACI Committee 211. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight, and Mass Concrete. ACI Journal 86 (January - February 1989) : 82-100
25. Boonjawat, J., Harncharoen, K., Chinanonwait, N., Aikawa, M., and Haraguchi, H., Continuous Monitoring and Kinetic Behavior of Carbon Dioxide and Methane in the Atmosphere, Thailand. Tropical Rain Forests in a Global Greenhouse. Matsuyama : International Symposium (January 1994) : (in Press)

- 26.Papadakis,V.G. ,Vayenas,C.G. ,and Fardis,M.N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. ACI Materials Journal 88 (July - August 1991) :363 - 373
- 27.Comite Euro-International du Beton. Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading. Bulletin d'Information No.162. Prague : CEB, 1983
- 28.Page, C.L., Basic Principles of Corrosion. In P. Schiessl (ed.), Corrosion of Steel in Concrete RILEM Report of the Tech. Com.60-CSC, pp.3-21. London : Chapman and Hall Ltd, 1988
- 29.Rostasy, F.S., and Bunte,D. Evaluation of on-site Condition and Durability of Concrete Panels Exposed to Weather. Durability of Structures, pp. 145-149. IABSE Symposium Lisbon, 1989
- 30.Uomoto T., and Cahyadi, J.H. Factors Affecting Influence of Ambient Moisture Content on Carbonation of Concrete. Proceedings of The Fourth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction., pp. 1401-1406. Seoul, 1993
- 31.จตุนิยมวิทยา, กรม. ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิในเขตกรุงเทพมหานคร. กรุงเทพมหานคร : กรมจตุนิยมวิทยา. 2538



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.1 ปริมาณโดยน้ำหนักของสารประกอบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน[2]

Type of Cement	General Description	Before Hydration				Hydration Product	
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Ca(OH) <sub>2</sub>	CSH
I	General Purpose	49	25	12	8	21.13	61.75
II	Modified General Purpose	46	29	6	12	19.69	63.50
III	High Early Strength	56	15	12	8	22.47	57.00
IV	Low Heat	30	46	5	13	15.08	68.50
V	Sulfate Resistant	43	36	4	12	20.23	68.25

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวคูณปรับแก้ให้เป็นกลางของ Hamada [4]

Factor	Portland cement		Blast Furnace Slag Cement		Pozzolanic Cement	Fly Ash Cement
	Normal	Early High Strength	30 - 40% Slag	60% Slag		
r <sub>c</sub>	1	0.6	1.4	2.2	1.7	1.9
r <sub>a</sub>	River Sand River Gravel		River Sand Pumiciye Gravel		Pumicite Sand Pumicite Gravel	Cinder
	1		1.2		2.9	3.3
r <sub>s</sub>	Plain		Air Entraining Agent		Dispersing Agent	
	1		0.6		0.4	

ตารางที่ 2.3 ค่าตัวคูณปรับแก้ให้เป็นกลางของ Kishitani [4]

Cement Type	River Sand			Pumicite Sand			Pumicite Sand		
	River Gravel			Pumicite Gravel			Pumicite Gravel		
	AE.	DA.		AE.	DA.		AE.	DA.	
Normal Portland	1.0	0.6	0.4	1.2	0.8	0.5	2.9	1.8	1.1
Early High Strength	0.6	0.4	0.2	0.7	0.4	0.3	1.8	1.0	0.7
BFSC (30-40% S.)	1.4	0.8	0.6	1.7	1.0	0.7	4.1	2.4	1.6
BFSC (60% S.)	2.2	1.3	0.9	2.6	1.6	1.1	6.4	3.8	2.6
Pozzolanic	1.7	1.0	0.7	2.0	1.2	0.8	4.9	3.0	2.0
Fly Ash (20%)	1.9	1.1	0.8	2.3	1.4	0.9	5.5	3.3	2.2

Note : AE. = Air Entrainment

DA. = Dispersing Agent

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 อายุของสะพาน กำลังอัดคอนกรีต และความลึกคาร์บอนเนชั่นที่วัดได้จากสะพานตัวอย่าง

ชื่อสะพาน (ชื่อตัวอย่าง)	อายุ ( ปี )	กำลังอัดคอนกรีต $f_c'$ (กก./ซม. <sup>2</sup> )	ช่วงความลึก คาร์บอนเนชั่น ที่วัดได้ (มม.)	ความลึก คาร์บอนเนชั่น เฉลี่ย (มม.)
* สะพานข้ามคลองสามเสน สามแยกพระราม9 (A)	1	270.5	4.3 - 8.3	5.9
สะพานลอยคลองตัน (B)	2	252.1	5.7 - 12.2	8.7
สะพานข้ามคลองสามเสน สามแยกพระราม9 (C)	3	368.7	3.6 - 7.6	6.2
สะพานหน้าอิลิตสปา (D)	6	572.4	5.0 - 12.2	11.3
** สะพานกษัตริย์ศึก (E)	25	360.9	12.8 - 39.5	22.5
สะพานกษัตริย์ศึก (F)	65	424.5	7.8 - 36.3	21.0

\* ก่อสร้างเพิ่มเติมเมื่อปี พศ. 2537

\*\* ก่อสร้างเพิ่มเติมเมื่อปี พศ. 2511

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีต

สะพาน	A	B	C	D	E	F
$f_c'$ (t)	270.5	252.1	368.7	572.4	360.9	424.5
$f_c'$ (28)	212.1	197.3	288.3	400.2	281.5	330.9
w	0.68	0.70	0.56	0.44	0.57	0.51
$\epsilon_p$	0.38	0.39	0.30	0.20	0.31	0.27
$c_1$	0.01437	0.01437	0.01437	0.01437	0.01437	0.01437
น้ำ (kg.)	175	175	175	175	175	175
ซีเมนต์ (kg)	257.4	250.0	312.5	397.7	307.0	343.1
$[C_{CH}]$	1016.7	987.6	1234.5	1571.2	1212.9	1355.5
$[C_{CSH}]$	1390.7	1350.9	1688.7	2149.3	1659.1	1854.3



ตารางที่ 4.3 ค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่วัดได้ในเขตกรุงเทพมหานคร [31]

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
1951	68	69	71	68	77	79	76	75	81	80	80	69	74
1952	67	71	75	70	81	81	82	85	84	89	84	78	79
1953	79	81	78	77	81	83	85	83	86	86	84	76	82
1954	78	76	76	78	83	81	83	83	86	84	78	74	80
1955	68	78	76	78	81	83	81	83	85	83	80	74	79
1956	74	77	76	81	82	82	82	84	86	84	80	73	80
1957	73	76	76	80	76	82	83	83	87	87	83	78	80
1958	74	76	77	75	73	77	82	84	86	85	77	75	78
1959	74	79	76	77	81	78	85	79	85	84	82	76	80
1960	72	70	75	72	77	75	80	81	84	86	83	75	78
1961	70	82	79	77	82	81	83	85	83	83	81	76	80
1962	70	71	77	76	79	80	81	83	86	84	79	73	78
1963	66	75	76	77	78	80	82	84	86	86	84	76	79
1964	74	71	72	75	84	79	82	81	87	84	77	72	78
1965	69	79	77	76	81	81	77	81	84	83	78	73	78
1966	73	80	76	75	81	78	78	82	80	82	75	75	78
1967	67	72	72	75	79	73	78	78	80	79	78	69	75
1968	71	77	76	78	80	80	77	76	81	79	74	72	77
1969	76	74	77	75	80	83	82	85	88	84	80	72	80
1970	76	81	84	82	85	81	80	83	85	82	78	83	82
1971	79	80	80	80	82	80	80	81	82	80	72	76	79
1972	70	78	77	81	74	80	80	78	84	82	83	78	79
1973	74	75	79	76	80	79	77	79	84	81	76	70	78
1974	75	74	78	80	80	78	78	81	81	86	81	75	79
1975	79	77	81	78	81	80	79	81	83	83	77	69	79
1976	66	79	76	73	80	72	78	81	80	82	77	71	76
1977	73	69	75	76	76	73	76	75	80	79	72	71	75
1978	74	78	76	74	79	81	79	77	82	78	73	67	77
1979	75	76	75	72	72	80	77	78	81	74	69	69	75
1980	71	71	75	74	72	80	77	77	80	82	76	69	75
1981	68	74	75	75	80	78	78	78	80	80	80	68	76
1982	68	77	76	75	76	79	78	80	82	82	76	70	77
1983	69	77	75	74	72	76	77	82	83	85	77	69	76
1984	72	74	73	74	74	77	77	74	80	79	73	69	75
1985	72	74	70	73	77	74	76	75	80	81	76	64	74
1986	65	73	68	72	74	73	77	74	79	82	72	71	73
1987	65	71	70	71	74	76	69	72	80	80	79	63	73
1988	66	75	71	75	80	73	75	80	81	80	66	65	74
1989	75	76	74	68	72	71	73	73	78	80	70	65	73
1990	71	72	71	66	74	71	73	72	77	79	73	66	72
1991	71	67	73	72	73	73	73	76	78	79	70	-	-
1992	70	73	72	68	70	74	76	77	77	79	65	66	72
1993	70	70	76	73	75	73	72	79	81	79	69	63	73
1994	70	73	73	71	77	78	77	79	-	-	-	-	-
mean	72	75	75	75	78	78	78	79	82	82	77	72	77



ตารางที่ 4.4 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้ในเขตกรุงเทพมหานคร [31]

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
1951	26.5	27.9	29.6	31.1	29.4	28.7	28.8	28.9	28.6	28.3	27.8	26.4	28.5
1952	27.6	29.0	29.4	30.8	29.0	28.1	27.9	27.3	27.5	27.0	26.9	23.9	27.9
1953	25.4	26.7	28.3	29.6	28.4	28.0	27.6	27.4	27.5	27.7	26.2	25.2	27.3
1954	27.1	27.1	28.4	29.6	28.4	28.6	27.9	27.6	27.0	27.2	25.8	24.3	27.4
1955	23.6	26.5	28.1	28.6	28.5	27.8	27.8	27.7	27.3	27.1	25.1	23.8	26.8
1956	24.0	27.3	28.9	28.3	28.1	28.0	27.6	27.3	27.0	27.2	25.0	24.2	26.9
1957	25.3	26.4	28.2	29.1	30.3	28.3	27.9	27.4	27.1	26.8	27.0	26.0	27.5
1958	25.9	26.5	28.9	29.9	30.5	29.2	27.9	27.6	27.3	27.1	25.6	24.0	27.5
1959	25.1	27.9	27.9	30.0	29.1	29.2	27.2	27.7	27.3	27.0	26.9	27.2	27.7
1960	26.0	27.2	29.2	30.5	29.6	28.6	28.1	28.1	27.6	27.2	27.0	25.0	27.8
1961	24.8	26.9	28.1	29.4	28.4	27.9	27.3	27.3	27.1	26.9	27.2	26.1	27.3
1962	24.8	25.7	28.1	29.4	29.1	28.1	27.7	27.3	26.8	27.2	26.6	24.3	27.1
1963	22.5	26.2	27.7	29.0	29.9	28.3	27.4	27.3	27.3	27.0	27.2	25.3	27.1
1964	27.3	27.5	28.5	29.6	27.9	28.2	27.8	27.3	27.1	27.5	25.3	24.4	27.4
1965	24.3	27.3	28.2	29.3	28.4	27.9	27.8	27.8	27.1	27.5	27.4	27.0	27.5
1966	27.0	28.0	29.6	30.3	28.6	28.6	28.2	27.9	27.8	27.9	27.4	26.9	28.2
1967	24.9	27.0	28.5	29.3	28.8	29.2	28.2	27.9	28.0	27.5	27.6	25.2	27.7
1968	26.0	26.8	28.5	28.3	28.9	28.6	28.8	28.6	28.2	27.9	28.3	28.1	28.1
1969	27.7	27.9	29.5	30.3	29.8	28.8	28.1	27.9	27.7	28.1	26.1	24.5	28.0
1970	26.6	27.0	28.8	29.1	29.1	28.5	28.1	27.8	27.9	27.4	26.7	25.8	27.7
1971	24.1	26.4	27.9	29.1	28.8	28.1	27.6	27.6	27.9	26.9	25.1	25.6	27.1
1972	24.4	27.2	27.4	28.4	30.3	28.5	28.5	28.0	27.8	28.3	27.3	26.1	27.7
1973	26.2	28.4	28.8	30.5	29.2	29.0	28.6	28.3	27.6	27.5	25.6	23.6	27.8
1974	24.5	26.0	27.9	28.4	28.3	28.4	28.1	27.9	28.1	27.3	26.2	26.2	27.3
1975	25.6	27.5	29.1	30.1	28.6	28.3	28.1	27.8	27.5	27.3	26.4	23.1	27.5
1976	23.7	26.6	28.2	29.9	28.2	29.0	28.1	27.6	27.8	27.8	25.9	26.1	27.4
1977	26.6	26.2	27.6	29.6	29.3	29.9	28.8	28.5	27.9	28.3	26.6	26.3	28.0
1978	27.0	26.9	29.4	30.3	29.1	28.7	28.3	28.3	27.6	27.9	27.4	26.4	28.1
1979	27.7	28.4	29.7	30.3	30.0	28.9	28.9	28.6	28.5	28.0	26.8	26.0	28.5
1980	26.8	28.1	29.7	30.7	31.0	28.5	28.7	28.4	28.0	27.8	27.4	26.7	28.5
1981	25.5	27.6	29.2	29.6	28.9	28.7	28.4	28.2	28.1	27.9	26.7	24.4	27.8
1982	25.5	28.0	28.9	29.1	29.7	28.6	28.2	27.8	27.6	27.9	28.5	24.0	27.8
1983	25.6	27.8	29.0	30.7	30.8	29.5	29.1	28.1	27.8	27.2	25.7	25.8	28.1
1984	25.5	28.1	28.9	30.3	29.7	28.6	28.4	28.7	27.8	27.3	27.3	26.3	28.1
1985	27.0	28.6	29.5	29.9	29.0	28.7	27.8	28.3	27.6	27.3	27.6	25.7	28.1
1986	25.0	27.3	28.0	29.9	29.1	29.3	28.2	28.6	28.1	27.6	27.1	25.9	27.8
1987	26.5	27.6	28.9	30.2	30.0	29.5	29.7	29.5	28.1	28.2	27.9	24.2	28.4
1988	27.2	28.2	29.9	29.9	29.0	29.1	28.8	28.2	28.2	27.3	26.0	25.3	28.1
1989	27.6	27.6	28.3	30.8	29.7	28.9	28.9	28.4	28.0	27.6	27.3	25.3	28.2
1990	27.7	28.5	29.1	30.7	29.5	29.5	28.5	28.8	28.1	27.7	27.2	26.4	28.5
1991	28.0	28.0	29.8	30.1	30.1	29.1	28.9	28.2	28.2	27.5	27.1	-	-
1992	25.2	27.5	29.3	31.3	31.1	29.6	28.9	28.4	28.4	26.7	26.2	26.4	28.3
1993	26.3	26.9	28.8	29.9	30.1	29.8	29.6	27.8	27.8	27.6	27.4	25.3	28.1
1994	26.9	28.9	28.7	30.6	29.5	28.7	28.4	28.0	-	-	-	-	-
mean	25.9	27.4	28.7	29.8	29.3	28.7	28.3	28.0	27.7	27.5	26.7	25.4	27.8



ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล( $\times 10E-5$ )ของแต่ละสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน

w \ RH	0.68	0.70	0.56	0.44	0.57	0.51
77.0 [X]	10.44	10.79	8.36	6.27	8.53	7.49
71.7 [ $P_{0.85}$ ]	12.84	13.26	10.27	7.71	10.49	9.20
70.5 [ $P_{0.90}$ ]	13.38	13.83	10.71	8.03	10.93	9.59
68.8 [ $P_{0.95}$ ]	14.19	14.66	11.36	8.52	11.59	10.17

ตารางที่ 5.1 ระดับความเสียหายขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็ก<sup>a</sup> [26]

Visual Indications	Damage Levels				
	A	B	C	D	E
Color changes <sup>b</sup>	rust stains	as in A	as in A	as in A	as in A
Cracking	some longitudinal	several longitudinal some on stirrups	extensive	as in C	as in C
Spalling	—	some	extensive	in some area steel is no more in contact with concrete	as in D
Loss in steel section <sup>c</sup> ( $\Delta A_s : A_s$ )	—	$\approx 5\%$	$\approx 10\%$	$\approx 25\%$	some stirrup broken main bars buckled
Deflections	—	—	—	possible	apparent

<sup>a</sup>  $A_s$  = bar cross section.

<sup>b</sup> Color modifications are not always present. Therefore, this indication is not a prerequisite for damage classification.

<sup>c</sup> Corresponding thickness of oxides:  $t_0 \approx a \cdot (\Delta A_s / A_s) \cdot \varnothing$ , where  $\varnothing$  = bar diameter,  $a \approx 0.5$  for plain oxides, and  $a \approx 1.0$  for oxides mixed with cementitious matter.

ตารางที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และอัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตในช่วงเวลาเริ่มต้น (สำหรับ  $w=0.5$ )

RH (%)	PS (%)	$i_a$ (แอมป์/ซม. <sup>2</sup> )	$i_b$ (กรัม /ซม. <sup>2</sup> ·วินาที)	$R_{ci}$ (มม./ปี)
63	20	—	—	—
77	40	$2.8 \times 10^{-8}$	$8.1 \times 10^{-12}$	$3.25 \times 10^{-4}$
82	48	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.89 \times 10^{-11}$	$1.16 \times 10^{-3}$
83	50	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.89 \times 10^{-11}$	$1.16 \times 10^{-3}$
85	53	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.89 \times 10^{-11}$	$1.16 \times 10^{-3}$
89	60	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.89 \times 10^{-11}$	$1.16 \times 10^{-3}$

ตารางที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และอัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตในช่วงเวลาการกัดกร่อน (สำหรับ  $w=0.5$ )

RH (%)	PS (%)	$i_{\infty}$ (แอมป์/ซม. <sup>2</sup> )	$i_b$ (กรัม /ซม. <sup>2</sup> ·วินาที)	$R_{\infty}$ (มม./ปี)
63	20	$1.77 \times 10^{-9}$	$5.12 \times 10^{-13}$	$2.06 \times 10^{-5}$
77	40	$1.15 \times 10^{-7}$	$3.33 \times 10^{-11}$	$1.34 \times 10^{-3}$
82	48	$6.11 \times 10^{-7}$	$1.76 \times 10^{-10}$	$7.09 \times 10^{-3}$
83	50	$9.28 \times 10^{-7}$	$2.68 \times 10^{-10}$	$1.08 \times 10^{-2}$
85	53	$1.73 \times 10^{-6}$	$5.01 \times 10^{-10}$	$2.01 \times 10^{-2}$
89	60	$7.48 \times 10^{-6}$	$2.16 \times 10^{-9}$	$8.69 \times 10^{-2}$

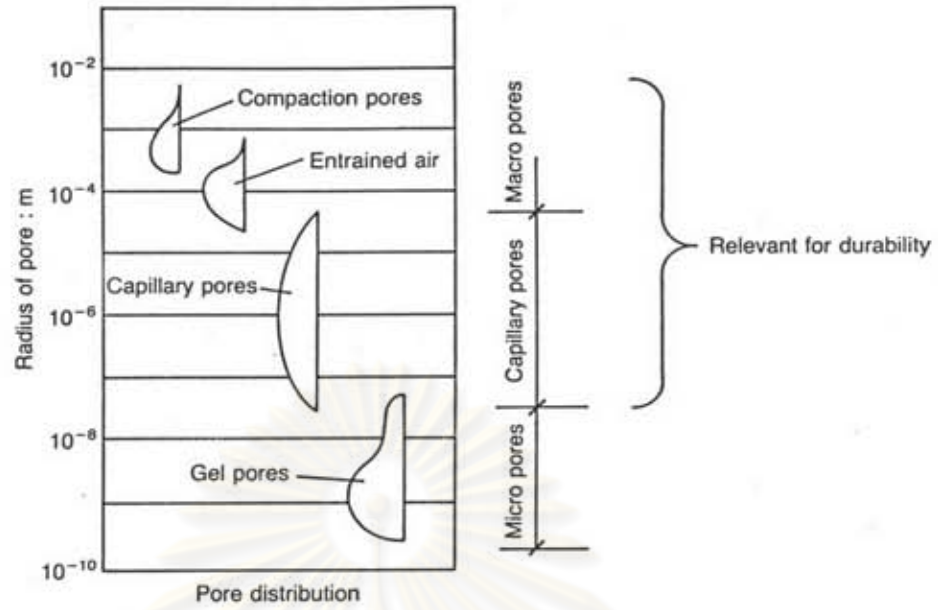
ตารางที่ 5.4 แสดงอายุการใช้งาน และระดับความเสียหายของสะพานที่ใช้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 โดยพิจารณาช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 2.41 (CEB MODEL)

bar diameter	RH (%)	$t_i$ (ปี)	$\phi(t_i)$ (มม.)	Areduction( $t_i$ ) (%)	$\phi(t_i+t_c)$ (มม.)	$t_c$ (ปี)	$t_{SL}$ (ปี)
Ø10	77	91.3	9.94	1.20	9.49	168.5	259.8
	82	91.3	9.79	4.16	9.49	21.0	112.3
	83	91.3	9.79	4.16	9.49	13.8	105.1
	85	91.3	9.79	4.16	9.49	7.4	98.7
Ø20	77	91.3	19.94	0.60	18.97	363.1	454.4
	82	91.3	19.79	2.09	18.97	57.6	148.9
	83	91.3	19.79	2.09	18.97	37.9	129.2
	85	91.3	19.79	2.09	18.97	20.3	111.6

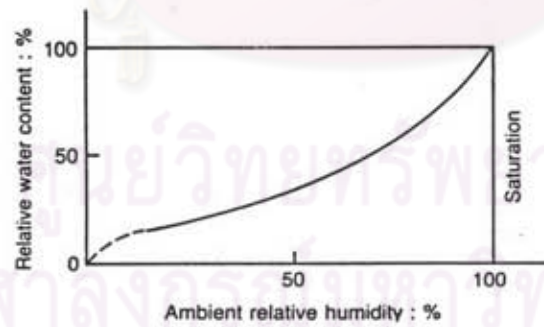
ตารางที่ 5.5 แสดงอายุการใช้งาน และระดับความเสียหายของสะพานที่ใช้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 โดยพิจารณาช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 4.10

bar diameter	RH (%)	$t_i$ (ปี)	$\phi(t_i)$ (มม.)	Areduction( $t_i$ ) (%)	$\phi(t_i+t_c)$ (มม.)	$t_c$ (ปี)	$t_{SL}$ (ปี)
Ø10	77	96.5	9.94	1.25	9.49	167.3	263.8
	82	96.5	9.78	4.44	9.49	20.1	116.6
	83	96.5	9.78	4.44	9.49	13.2	109.7
	85	96.5	9.78	4.44	9.49	7.1	103.6
Ø20	77	96.5	19.94	0.63	18.97	361.8	458.3
	82	96.5	19.78	2.23	18.97	56.7	153.2
	83	96.5	19.78	2.23	18.97	37.3	133.8
	85	96.5	19.78	2.23	18.97	20.0	116.5

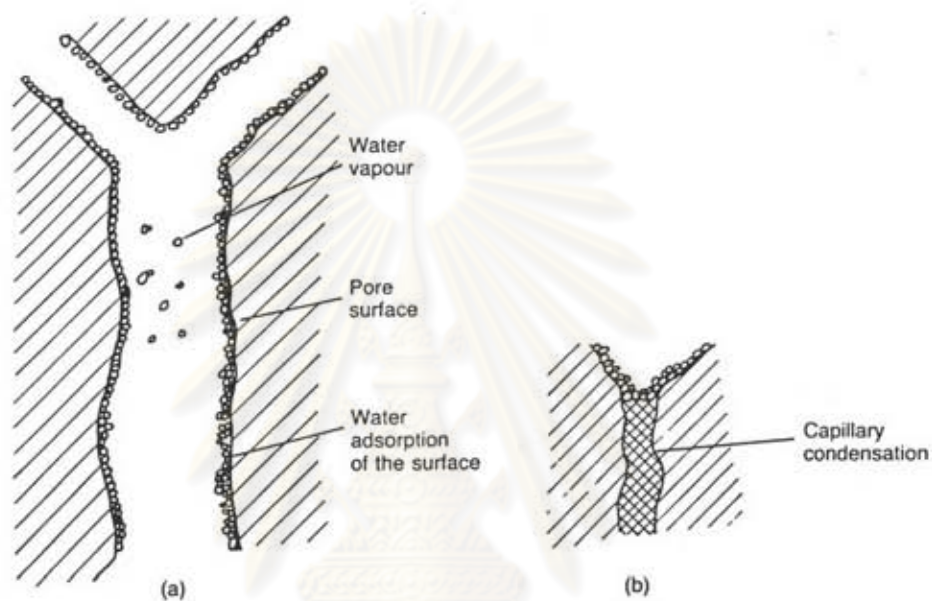




รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายขนาดของรูพรุน [1]



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ  
กับปริมาณน้ำในเนื้อคอนกรีต [1]

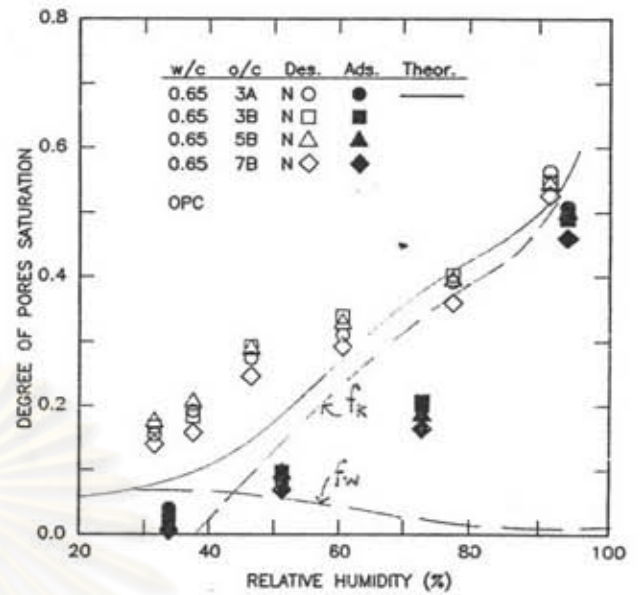
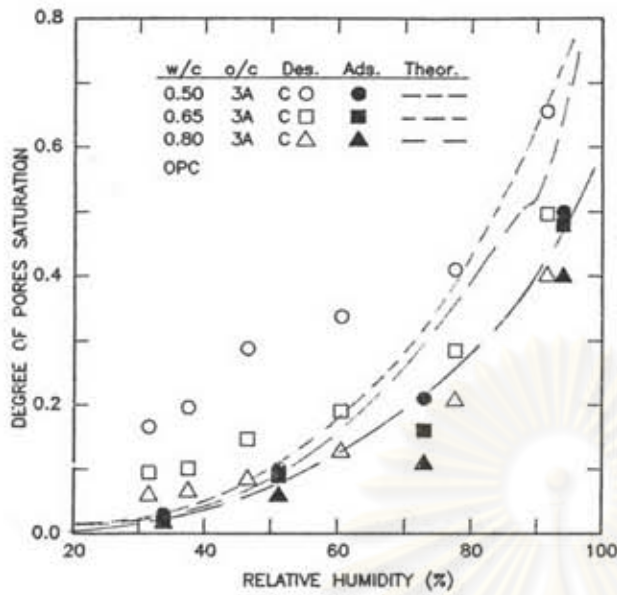


รูปที่ 2.3 แบบจำลองรูพรุนอย่างง่ายแสดงปรากฏการณ์ยึดเกาะ [1] :

(a) การดูดซับน้ำ (Water adsorption)

(b) การควบแน่นคาปิลลารี (Capillary condensation)

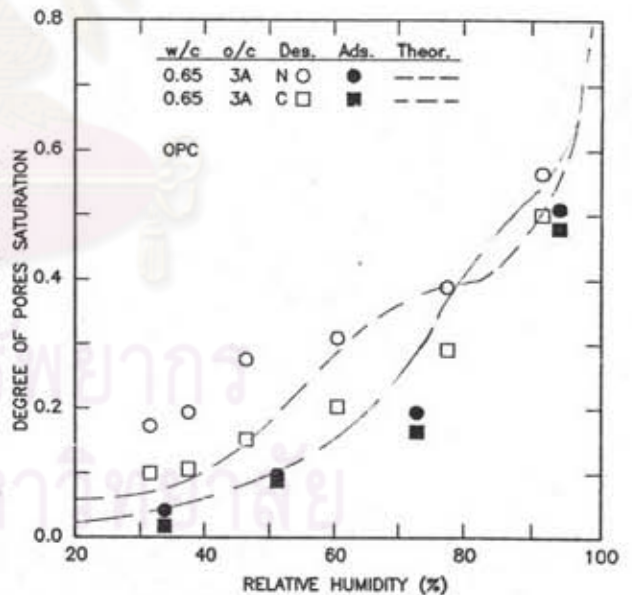
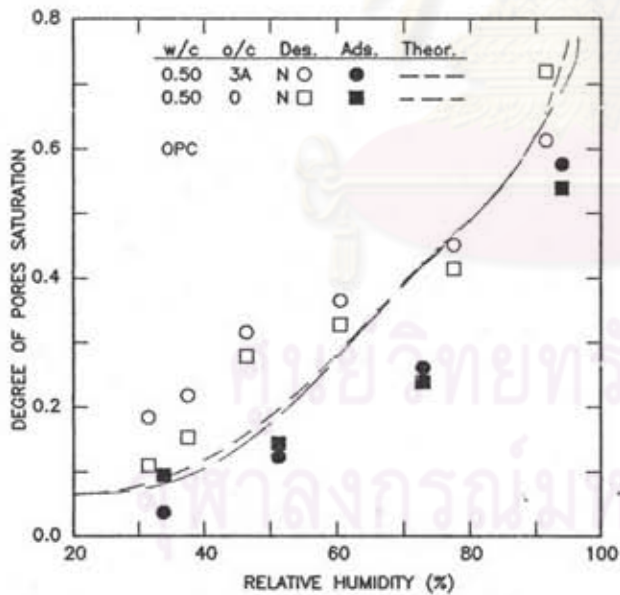
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) ผลจากสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ข) ผลจากสัดส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์

A = ทราบคละ ; B = ทราบ และกรวด



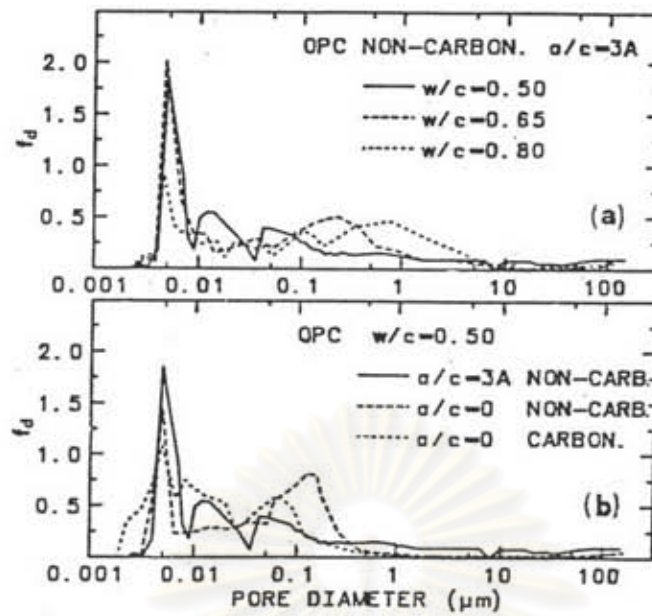
ค) ผลของมวลรวมต่อซีเมนต์เฟสท์

ง) ผลของการเกิดคาร์บอนขึ้น

รูปที่ 2.4 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อระดับความอิ่มตัวของรูพรุน

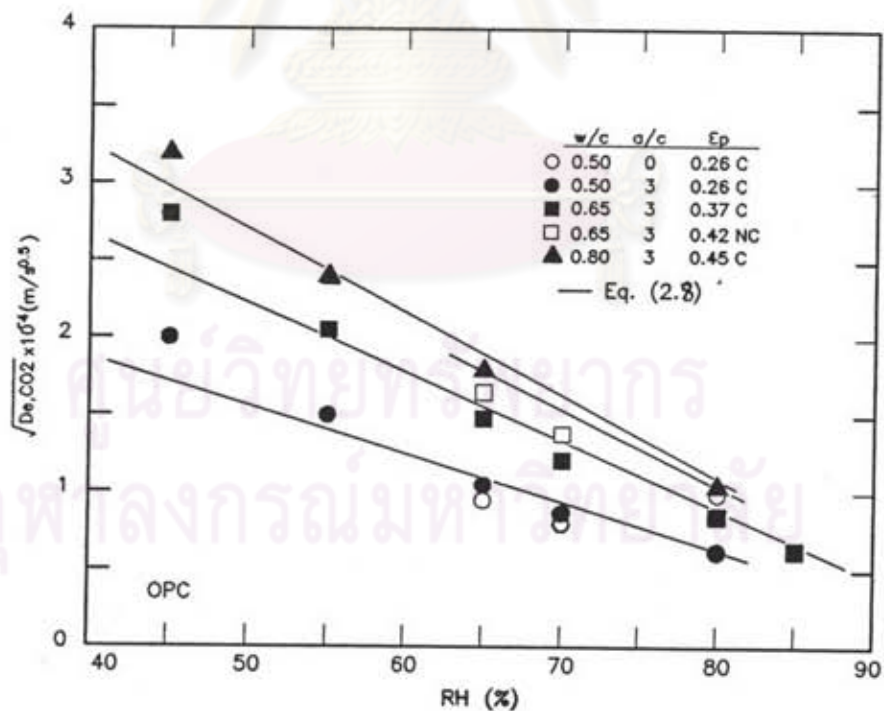
หมายเหตุ C = เป็นคาร์บอน ; N = ไม่เป็นคาร์บอน





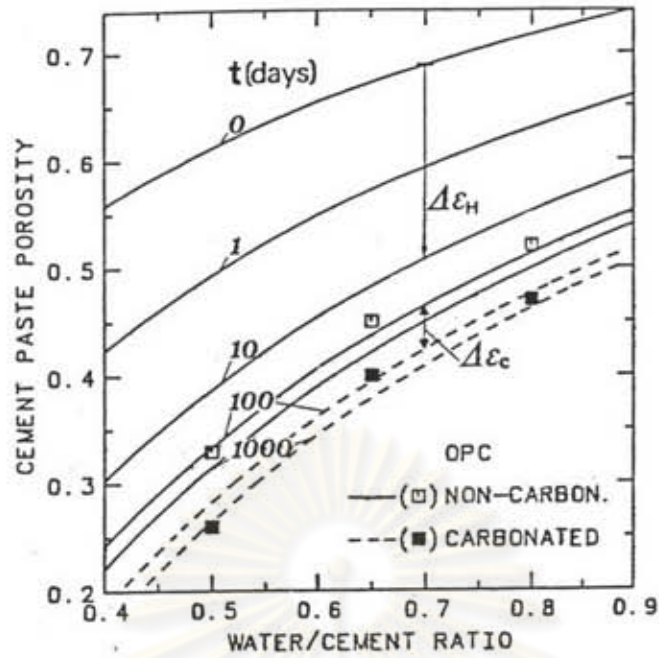
รูปที่ 2.5 การกระจายขนาดของรูพรุนในซีเมนต์เพสต์  
ที่ไฮเดรตสมบูรณ์ [3]

- a) ผลของสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์  
b) ผลของการเกิด และไม่เกิดคาร์บอนชั้น และการเติมมวลรวม

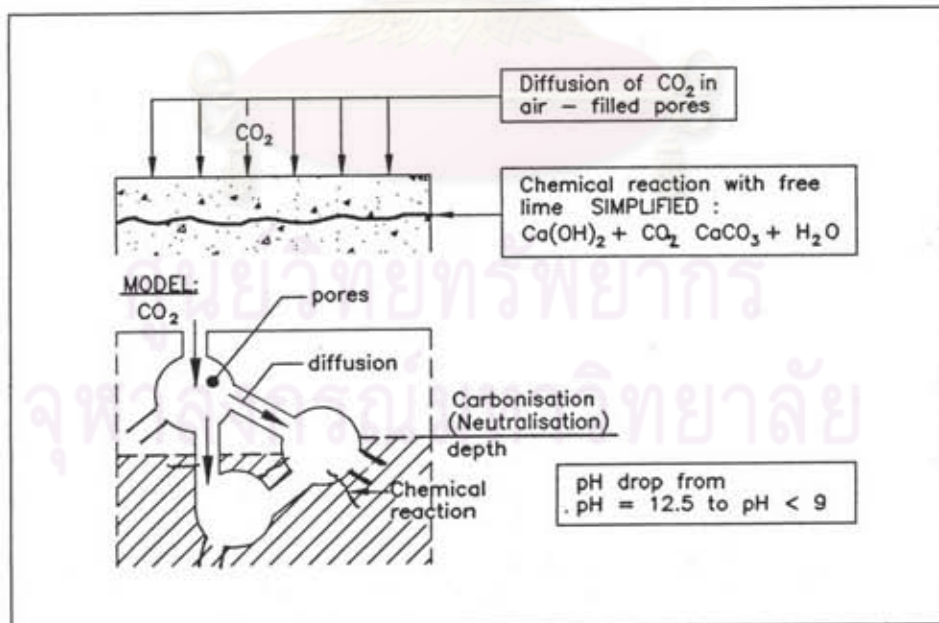


รูปที่ 2.6 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่  
ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในคอนกรีต [8]

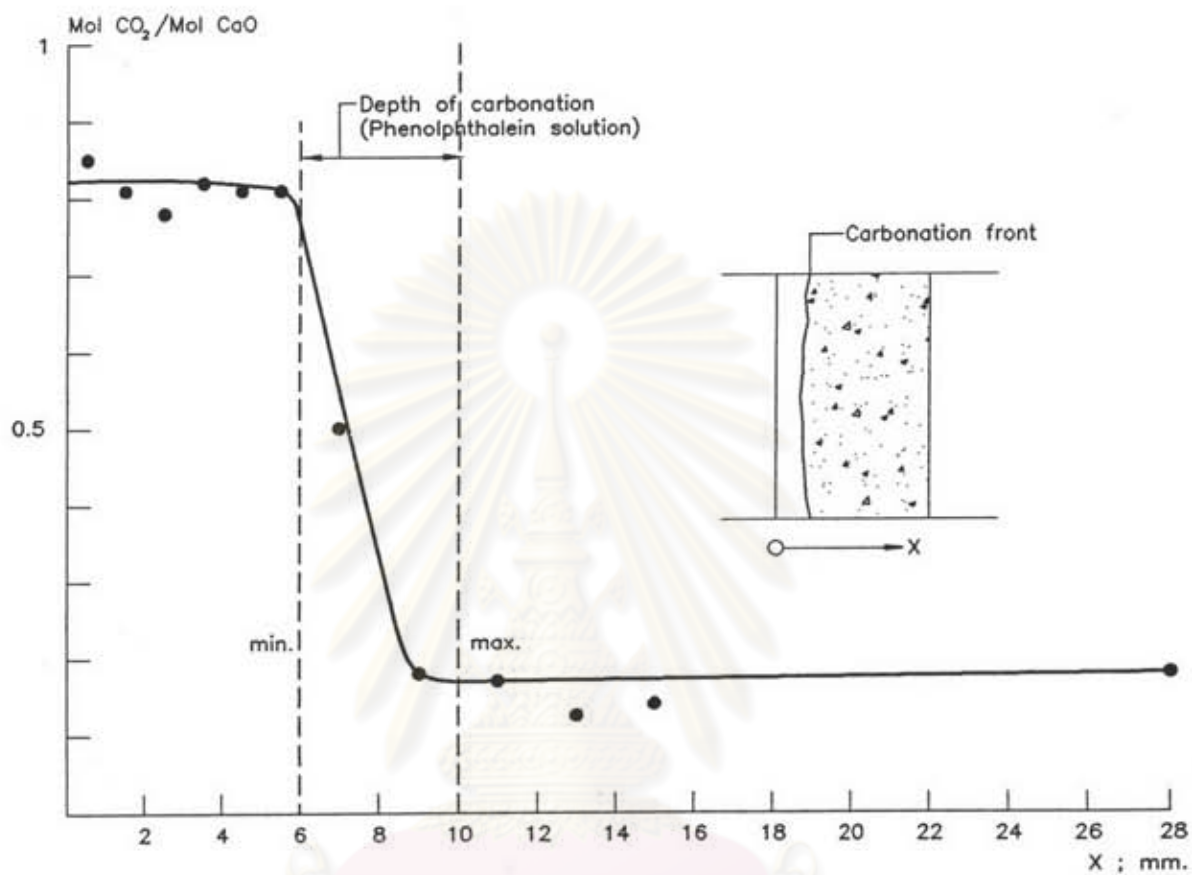
C = เป็นคาร์บอนเนต, NC = ไม่เป็นคาร์บอนเนต



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความพรุนของซีเมนต์เพสต์ ตามอายุ และ สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ [3]



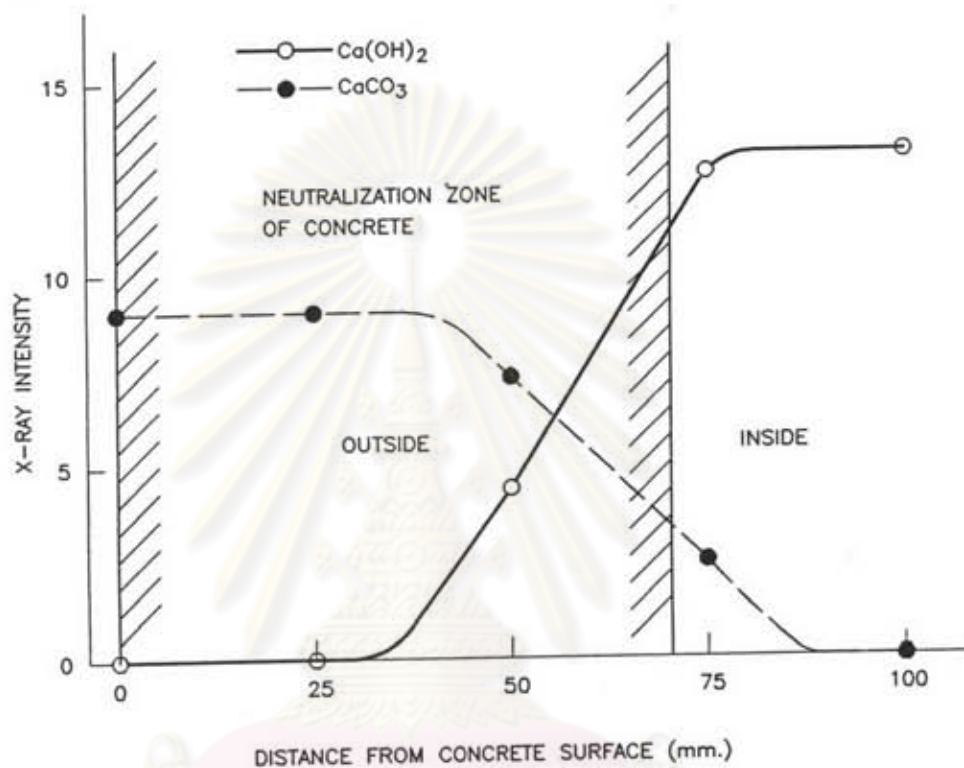
รูปที่ 2.8 มังแสดงขบวนการการเกิดคาร์บอนเนชั่น [11]



รูปที่ 2.9 แสดงสัดส่วนของ  $\text{CO}_2 / \text{CaO}$  ที่วัดได้ ในคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนต [6]

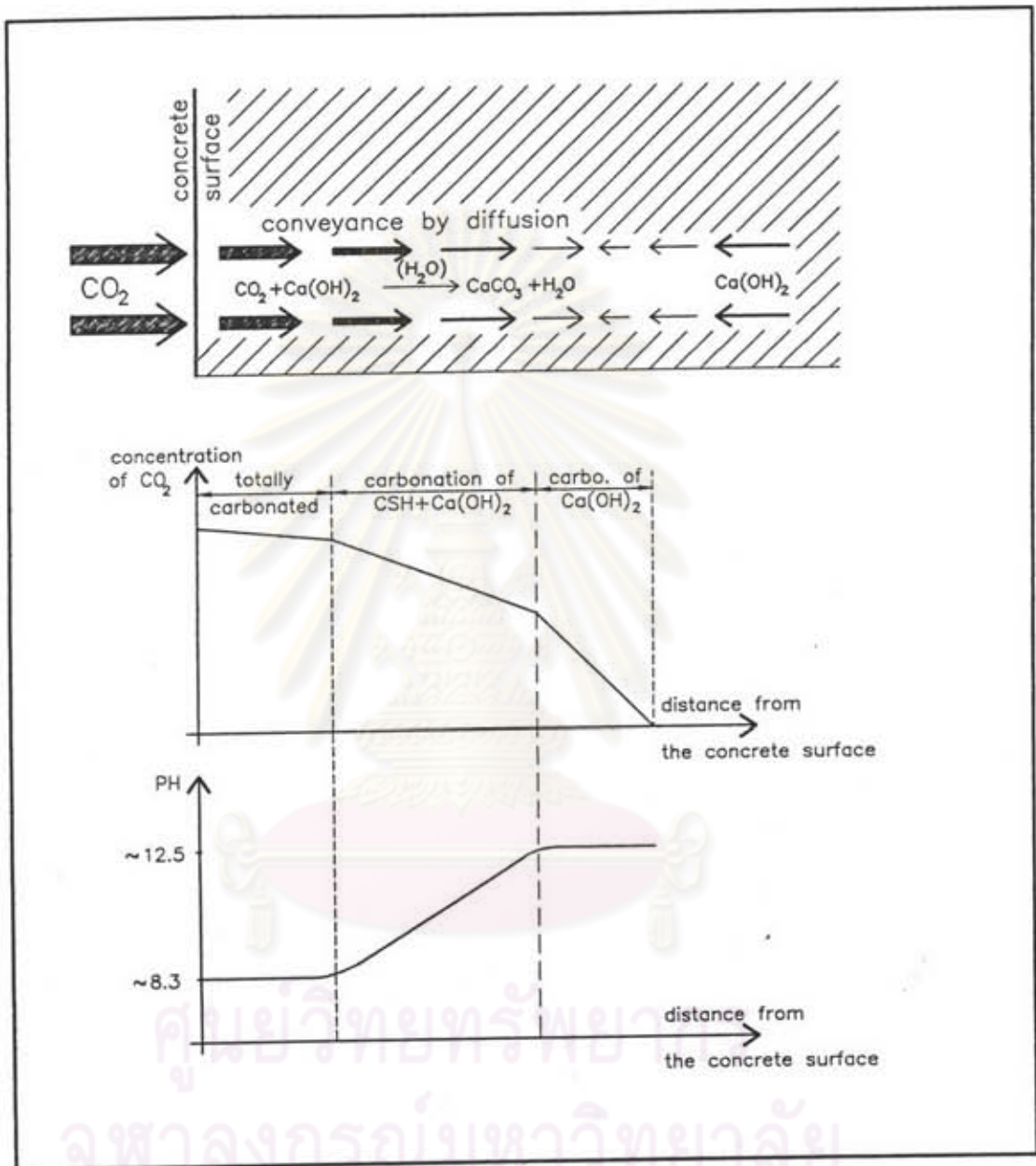
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



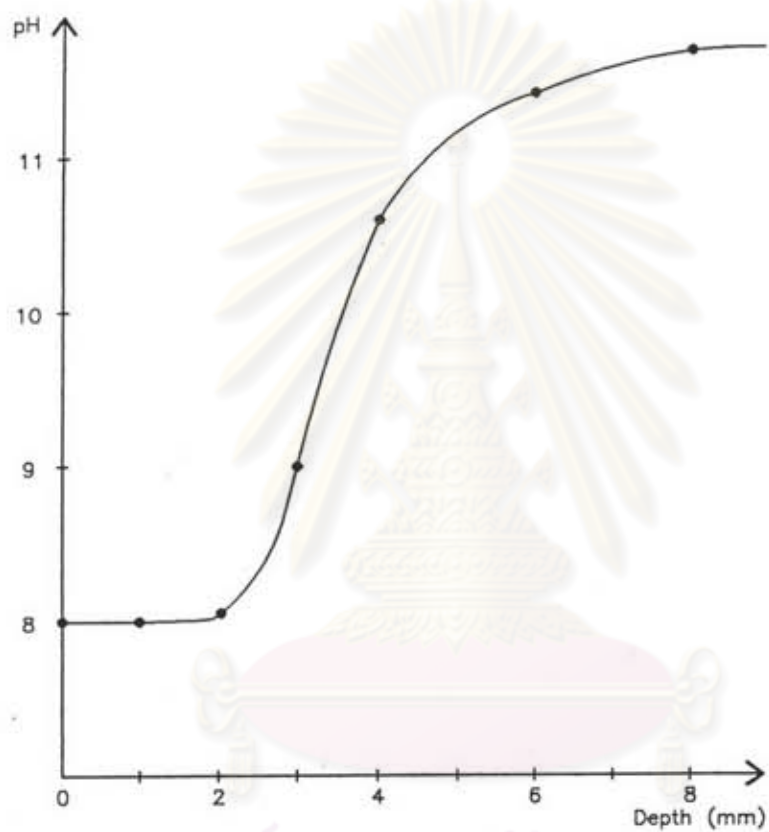


รูปที่ 2.10 สภาพความเป็นกลางจากผิวหน้าคอนกรีต [12]

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

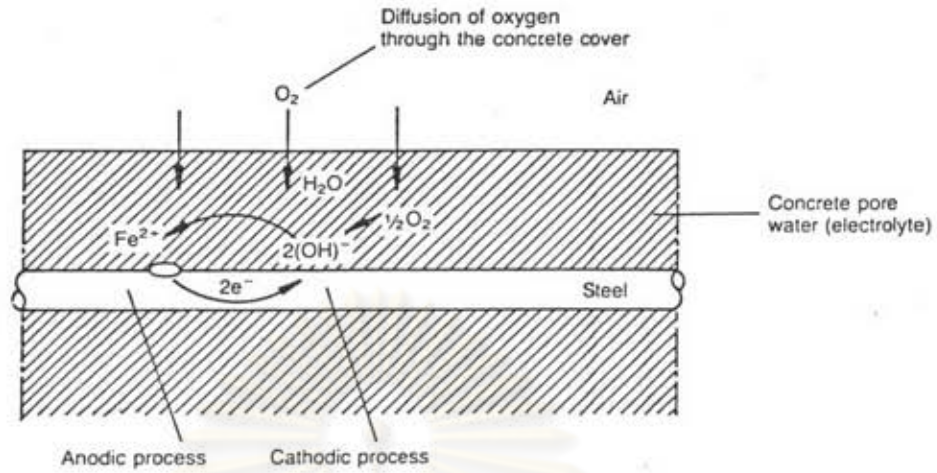


รูปที่ 2.11 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต [13]

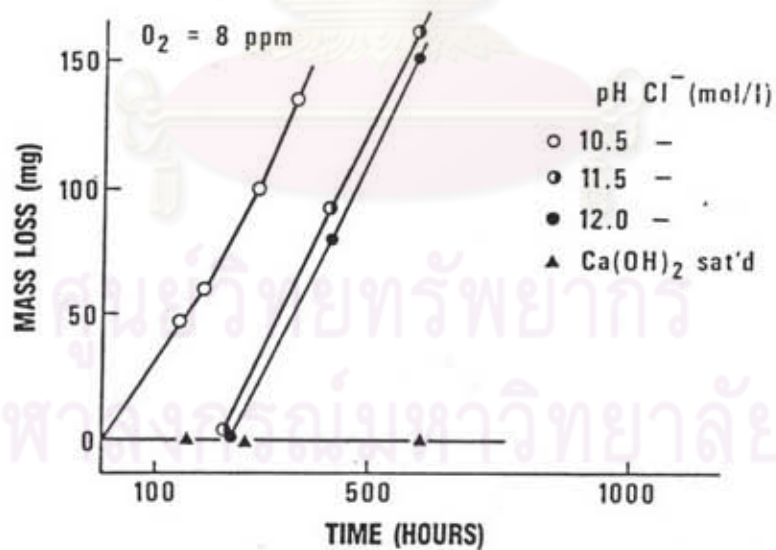


รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามความลึกของคอนกรีตเมื่อเกิดคาร์บอนเนชัน [12]

ศูนย์วิทยพัชร์พยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

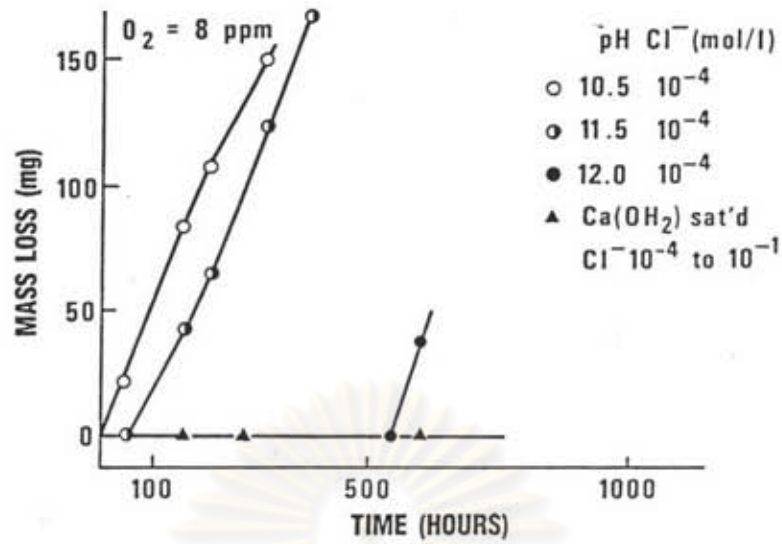


รูปที่ 3.1 แบบจำลองอย่างง่ายแสดงการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต [1]

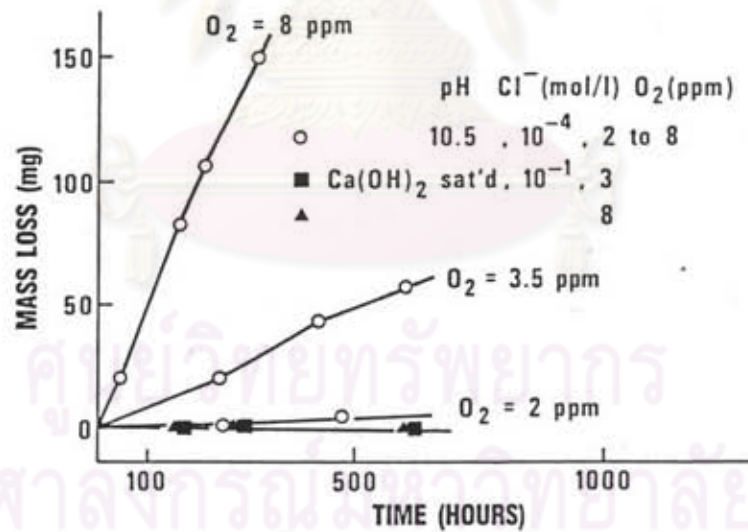


รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียมวลของเหล็ก กับเวลา ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ผลกระทบบของค่า pH ที่มีต่อการเริ่มต้นการกัดกร่อน)[19]

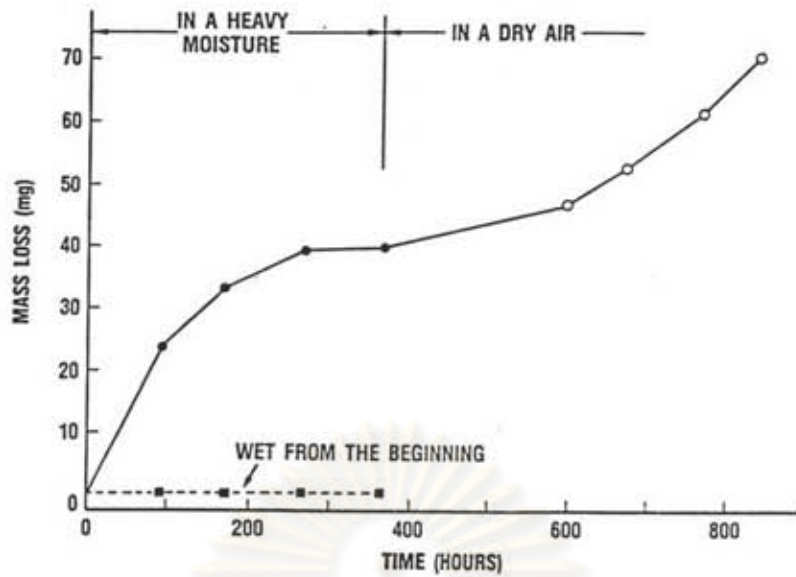




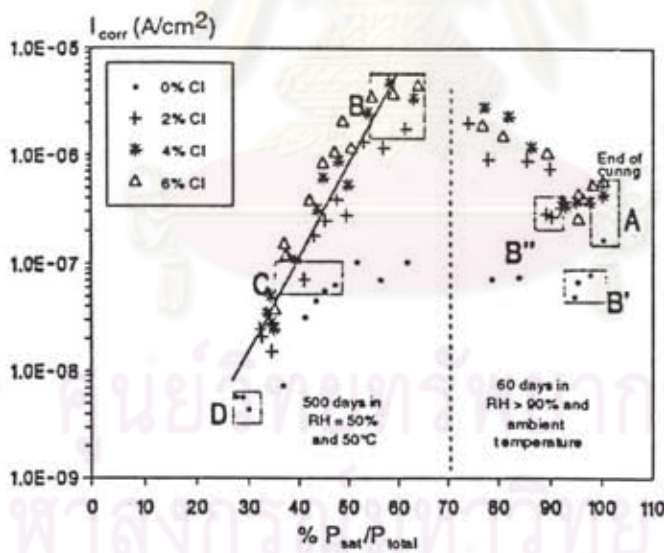
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียมวลของเหล็ก กับเวลา ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ผลกระทบของค่า pH และประจุของคลอไรด์) [19]



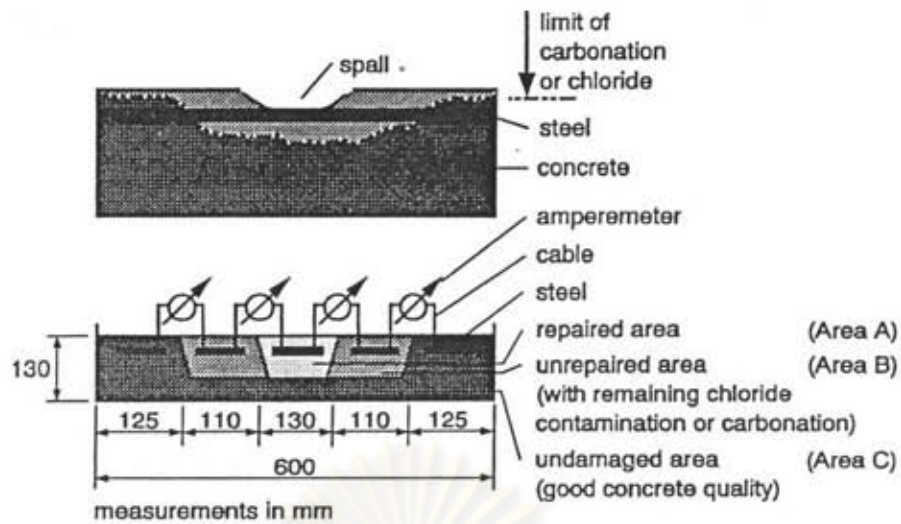
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียมวลของเหล็ก กับเวลา ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ผลกระทบของความเข้มข้นของออกซิเจน) [19]



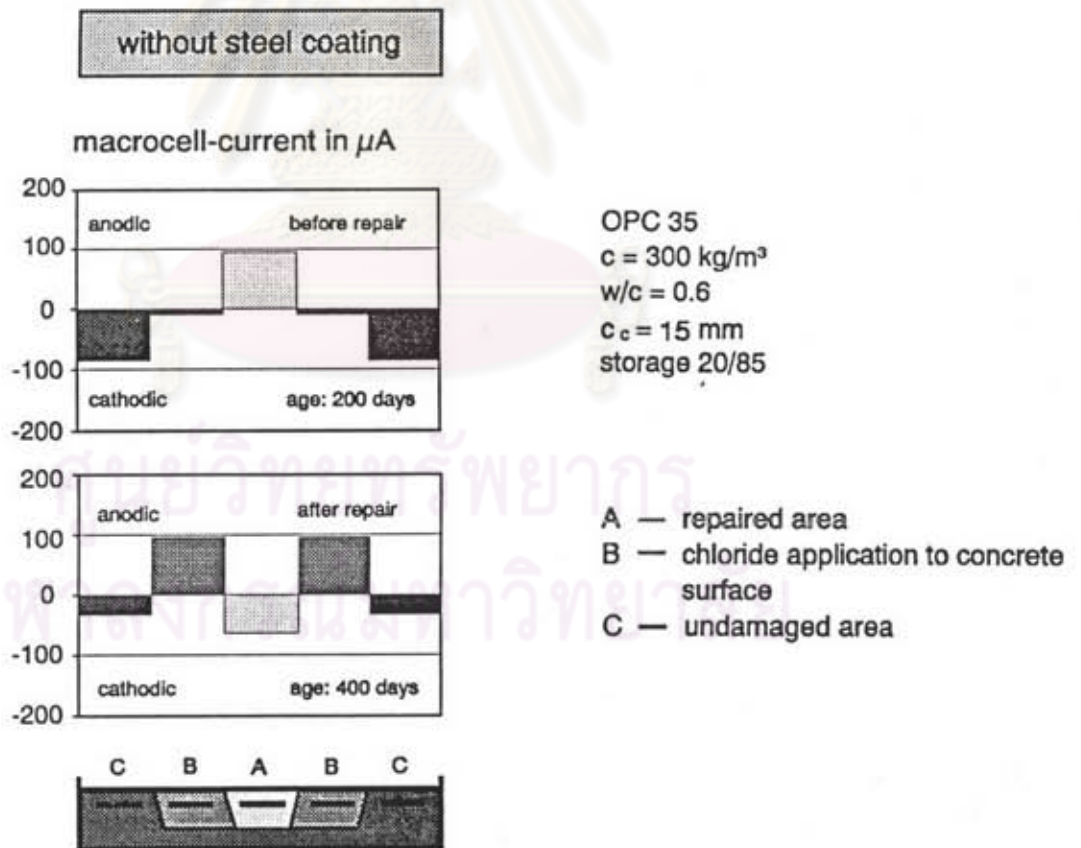
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียมวลของเหล็ก กับเวลา แสดงให้เห็นถึงผลกระทบ ของความชื้นที่มีต่อการกัดกร่อนของเหล็กในทราย [19]



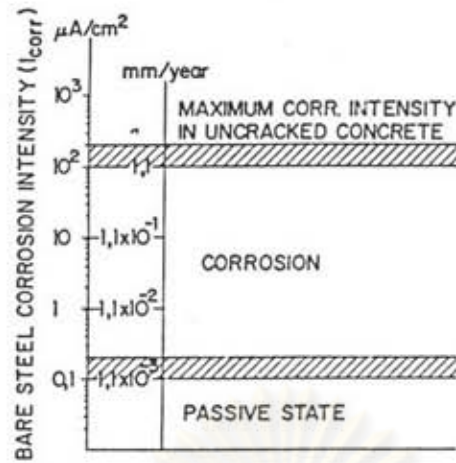
รูปที่ 3.6 อิทธิพลของระดับความอืดตัวของรูพรุน ที่มีต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริม [20]



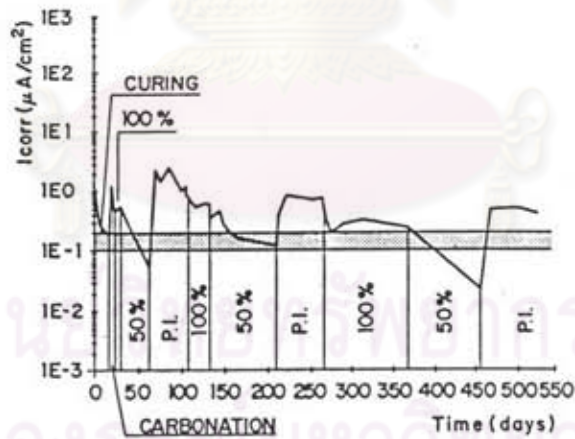
รูปที่ 3.7 ไดอะแกรม แสดงความเสียหายเฉพาะที่ในคอนกรีต และโครงสร้างตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซม [22]



รูปที่ 3.8 แสดงผลการวัดกระแสแบบเซลล์ขนาดใหญ่ (Macrocell) ของตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซม [22]

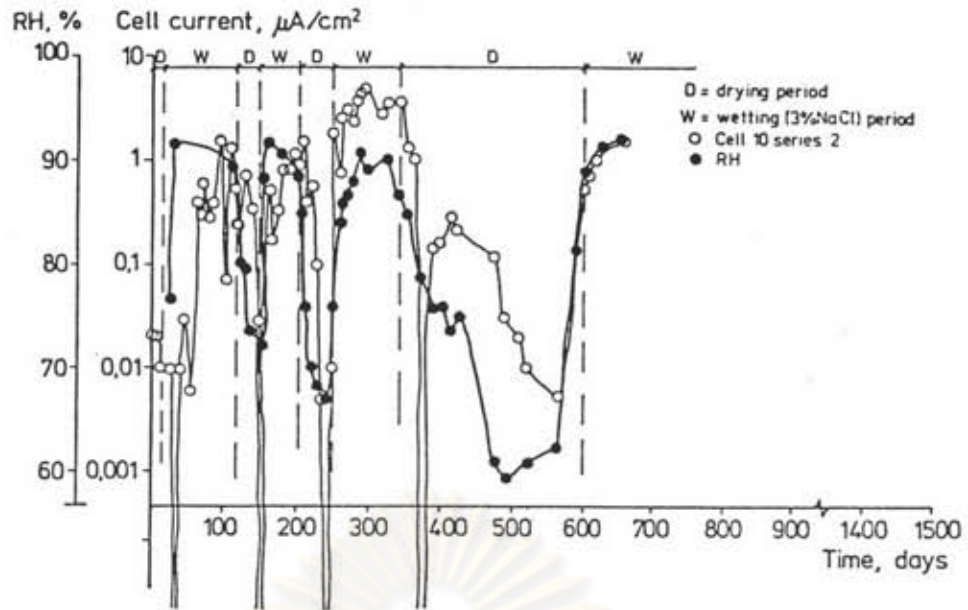


รูปที่ 3.9 ค่าของความแรงในการกัดกร่อน ในหน่วยไมโครแอมป์ / ซม.<sup>2</sup> และในหน่วย มิลลิเมตร / ปี ที่วัดได้ในคอนกรีต [23]

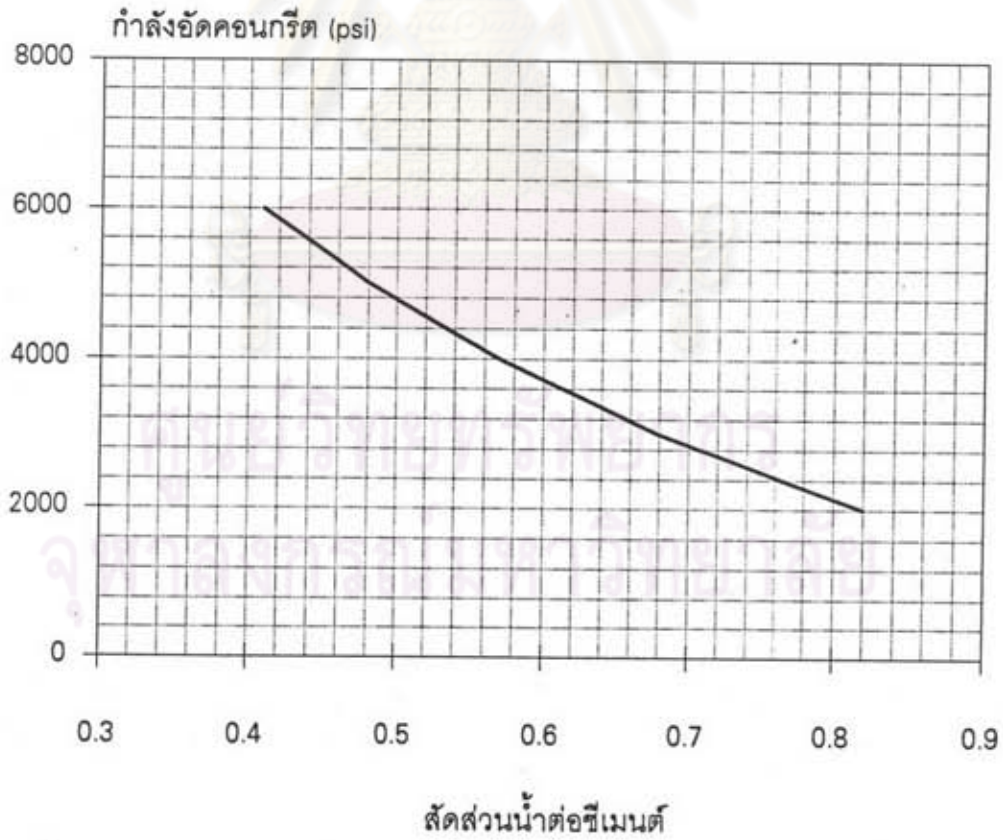


รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงค่าของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $i_{corr}$ ) กับเวลา [23]

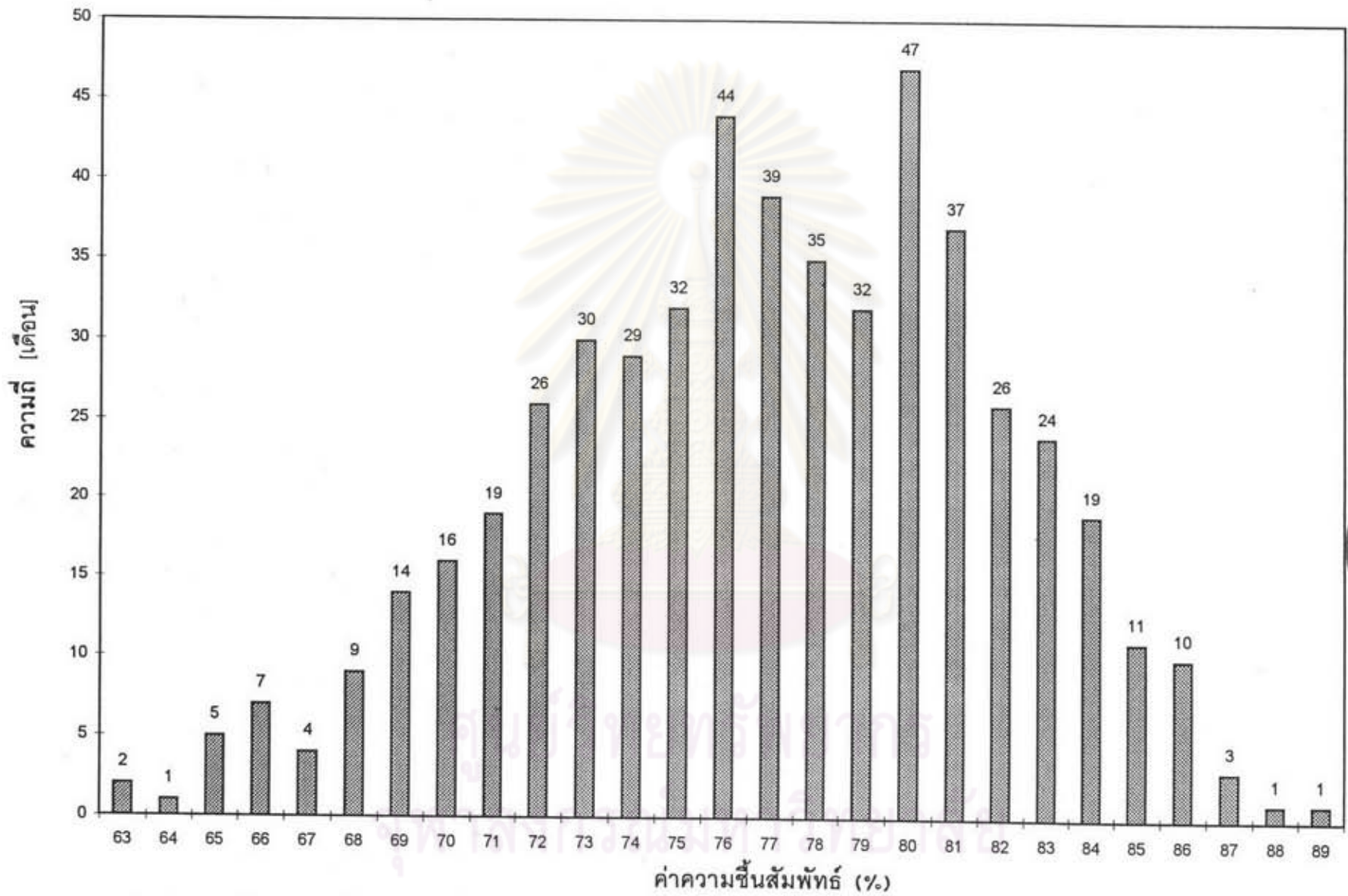




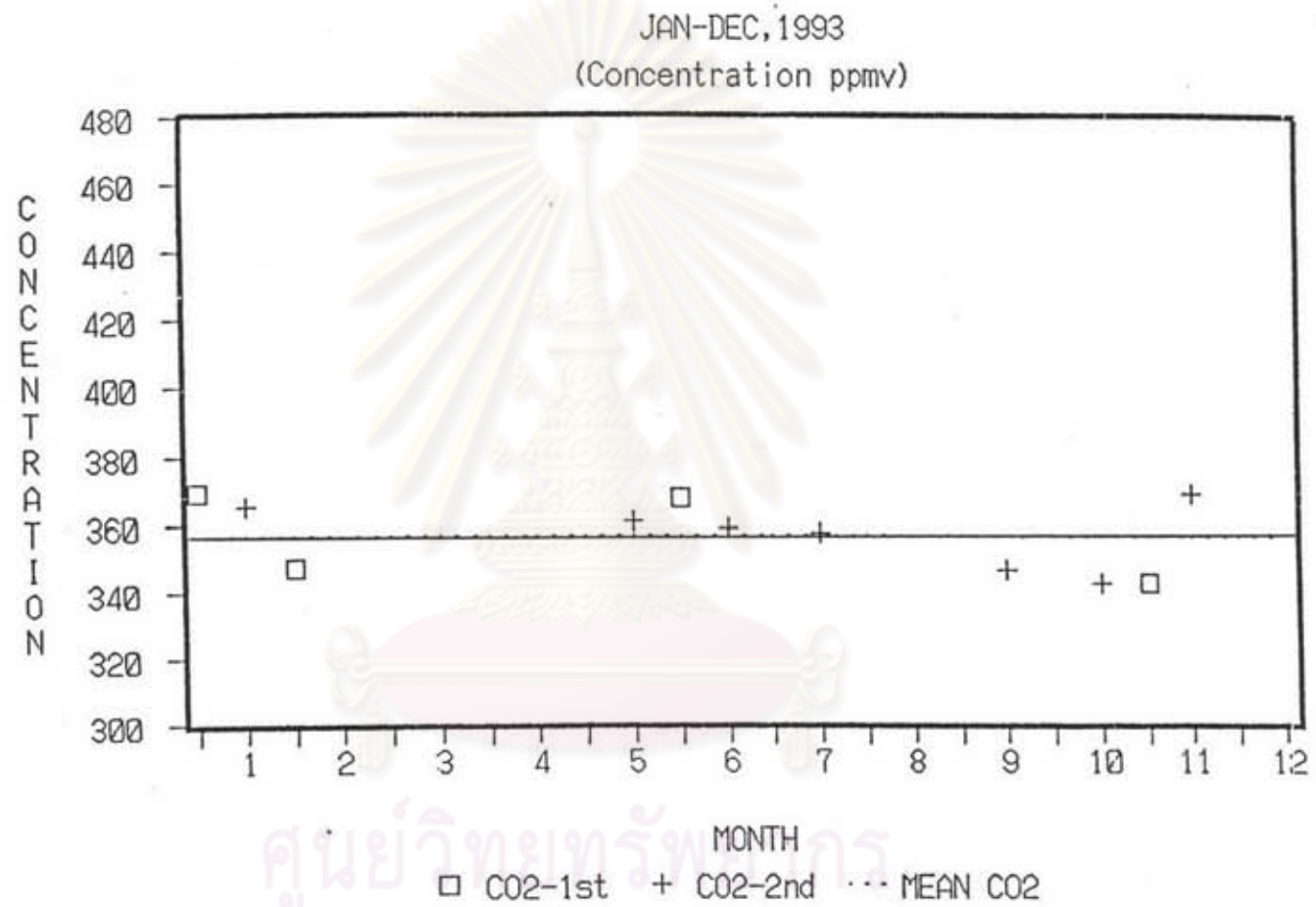
รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับความชื้นสัมพัทธ์ตามเวลา [6]



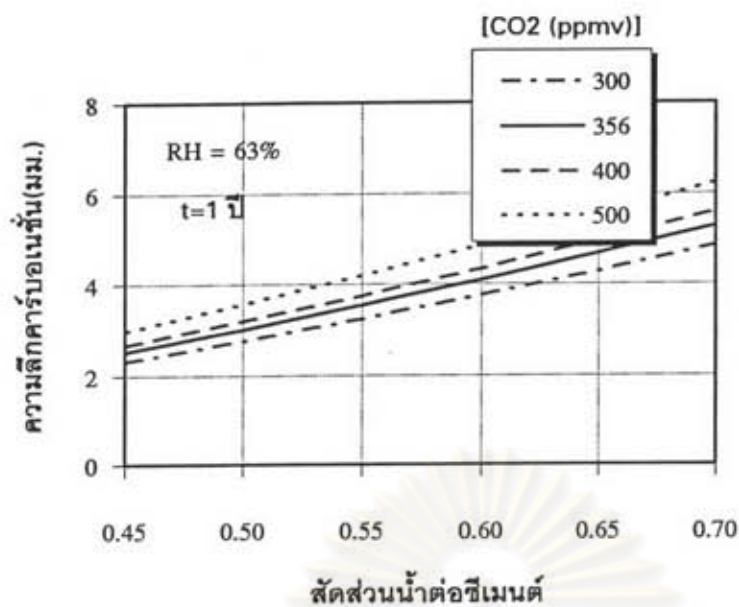
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ [24]



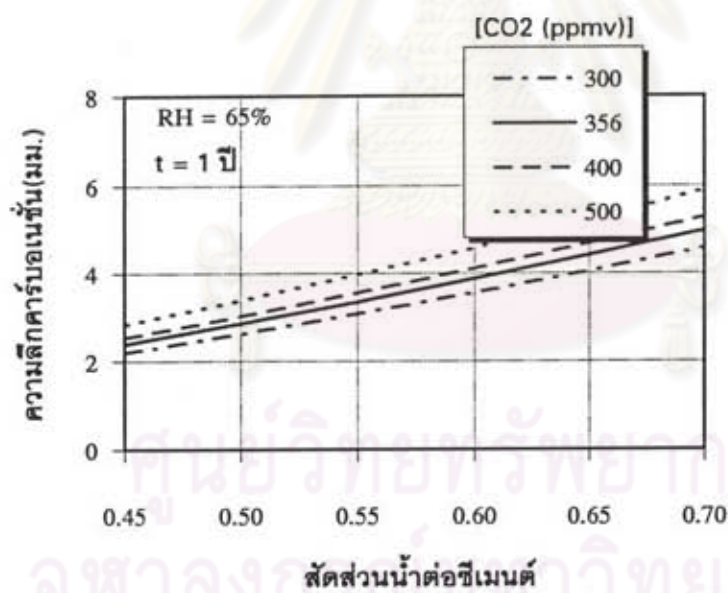
รูปที่ 4.2 ความถี่ของความขึ้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือนในเขตกรุงเทพมหานคร [31]



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ในปี พ.ศ.2536 [25]

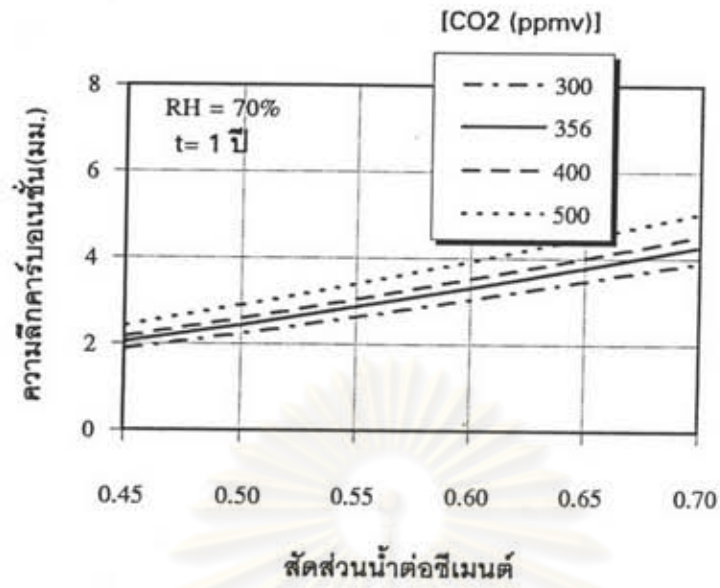


รูปที่ 4.4 ความลึกคาร์บอนเนชันตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 63 เปอร์เซ็นต์

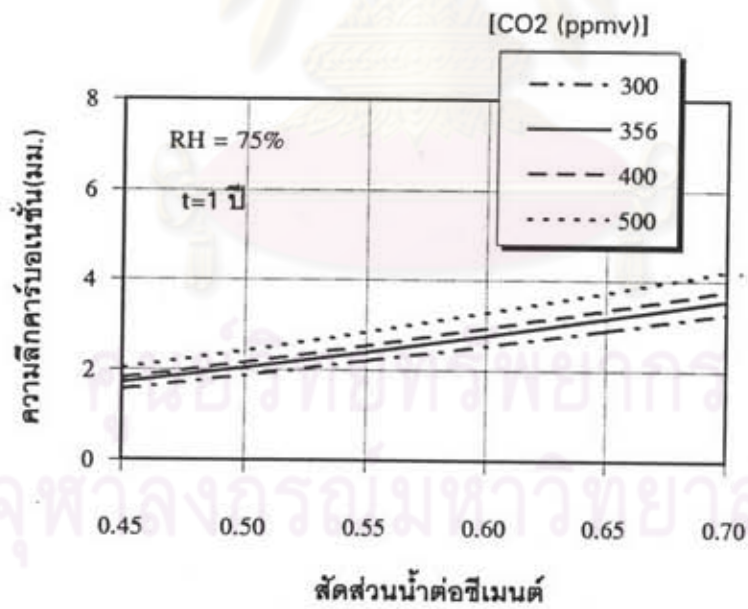


รูปที่ 4.5 ความลึกคาร์บอนเนชันตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 เปอร์เซ็นต์

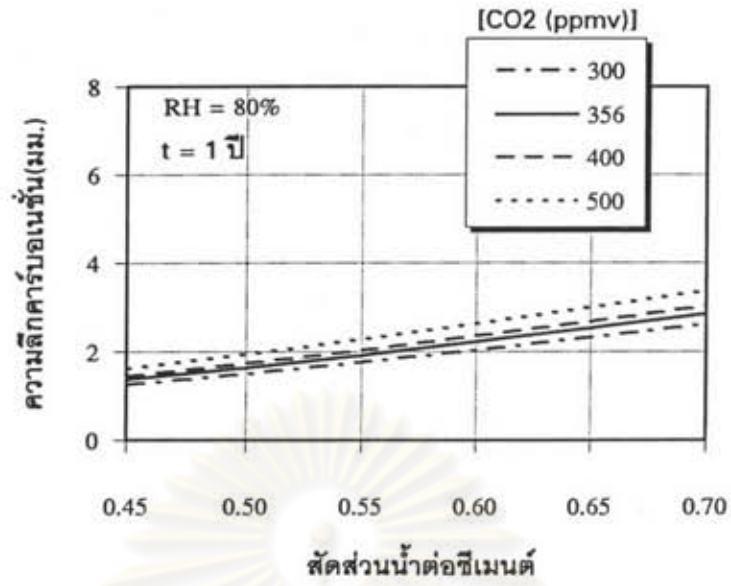




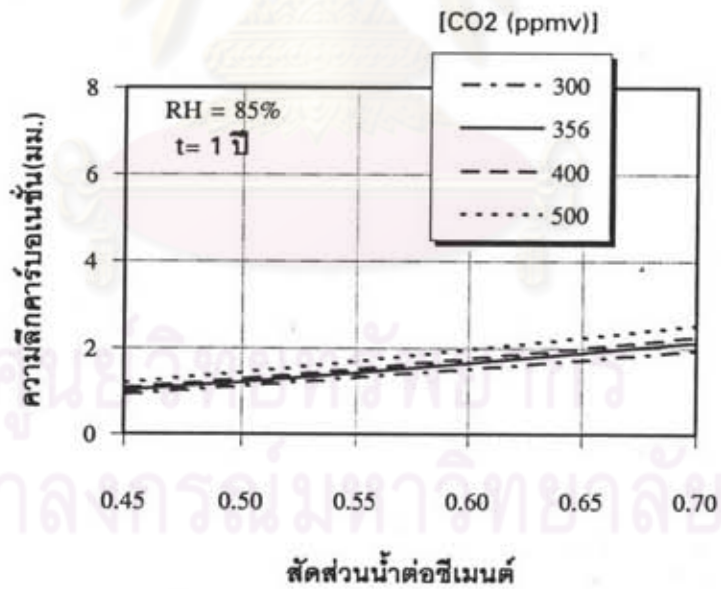
รูปที่ 4.6 ความลึกคาร์บอนเนชั่นตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์



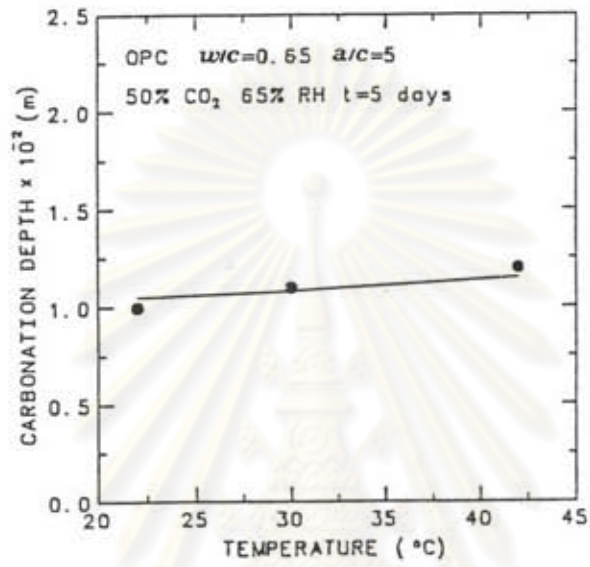
รูปที่ 4.7 ความลึกคาร์บอนเนชั่นตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.8 ความลึกคาร์บอนเนชันตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์

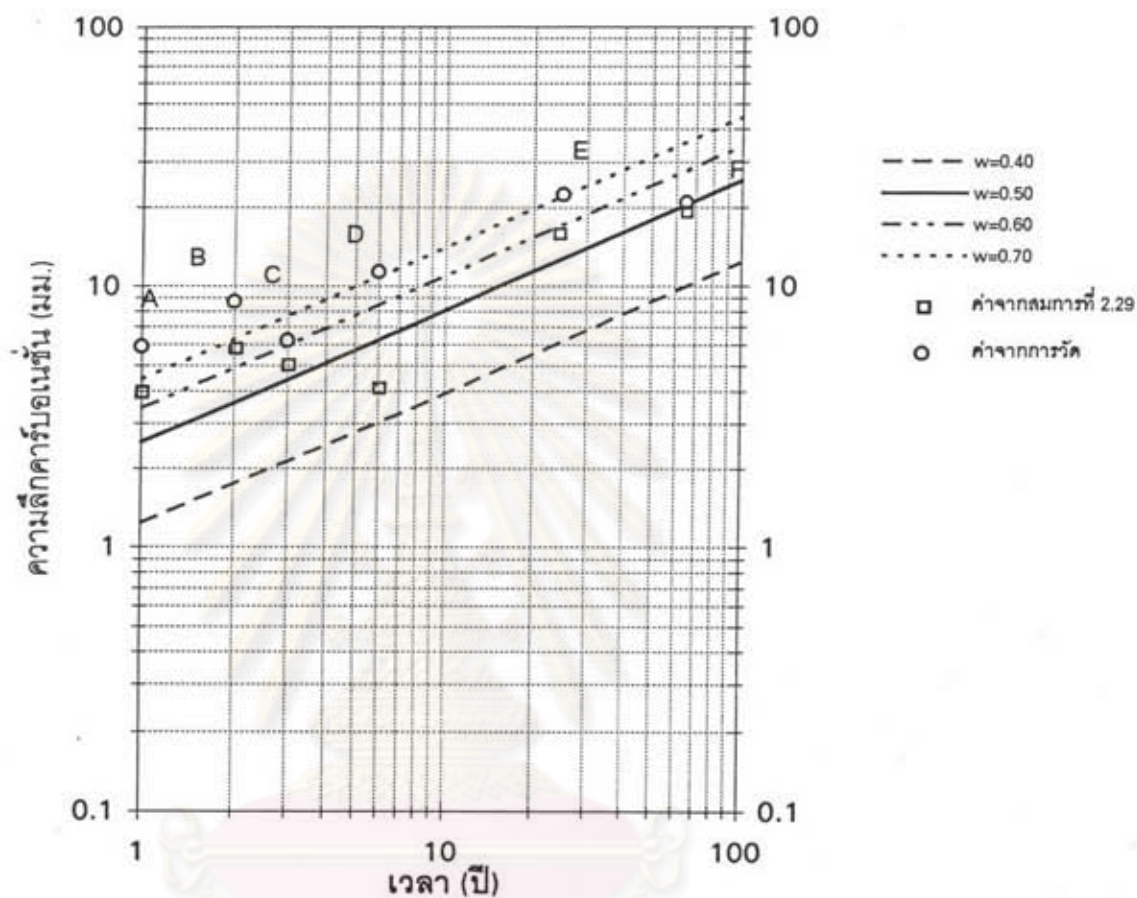


รูปที่ 4.9 ความลึกคาร์บอนเนชันตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 85 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.10 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความลึกคาร์บอนเนชั่น [26]

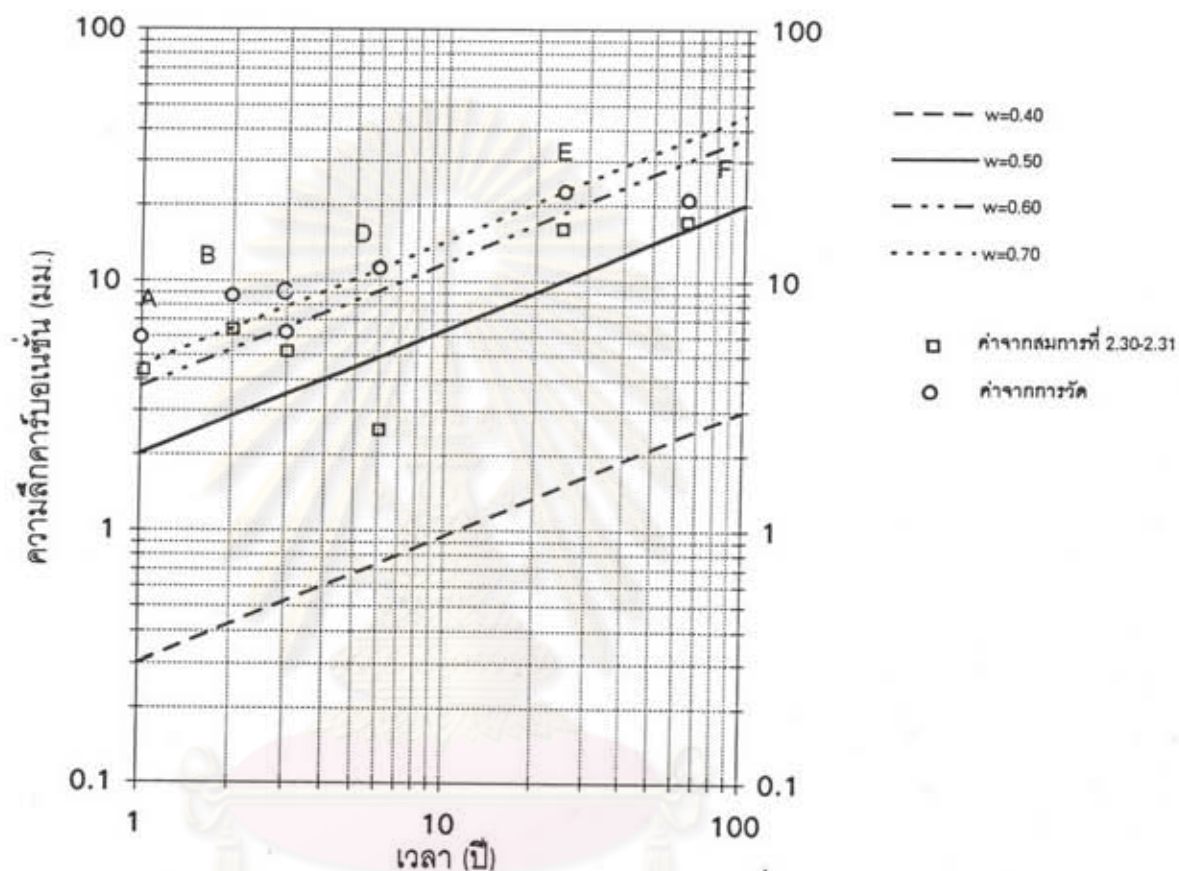
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ความลึกคาร์บอนเนชั่นวัดได้จากสะพานตัวอย่าง เทียบกับสมการที่ 2.29

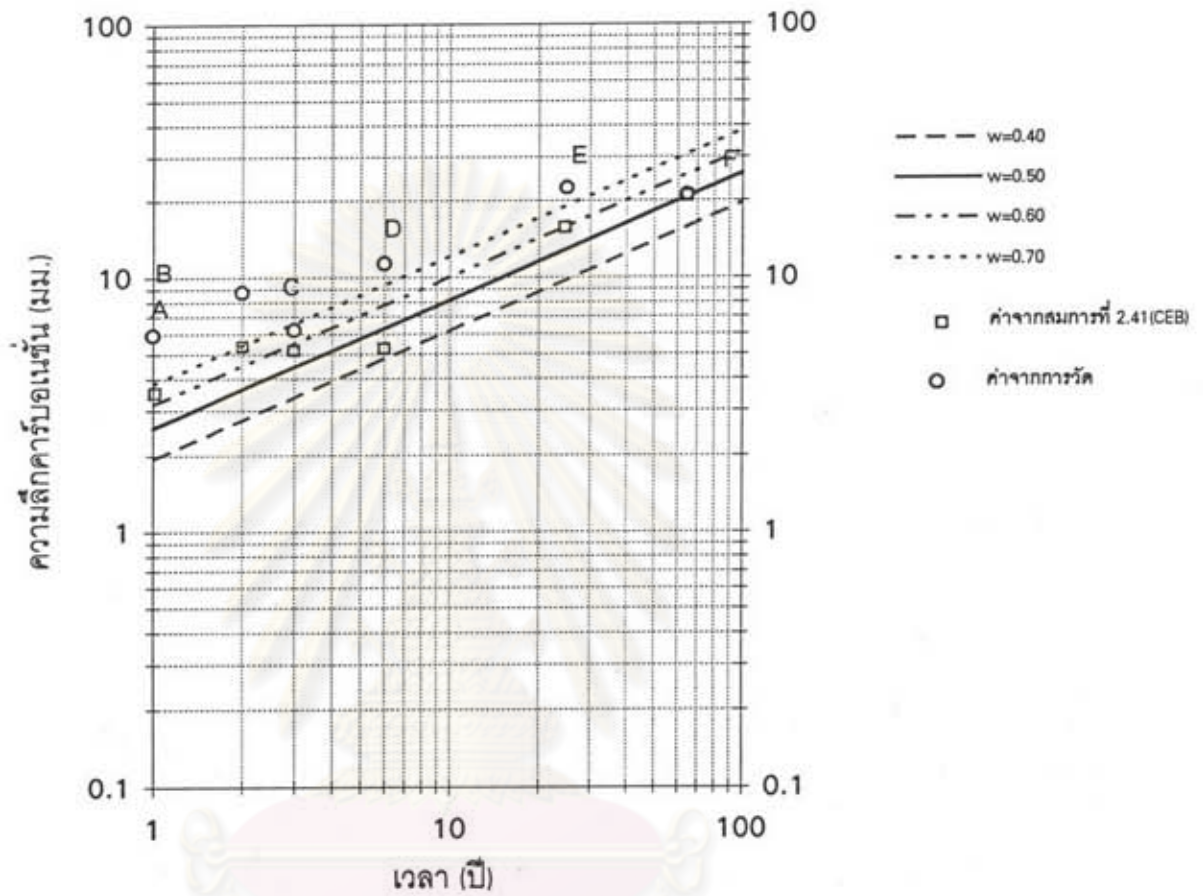
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





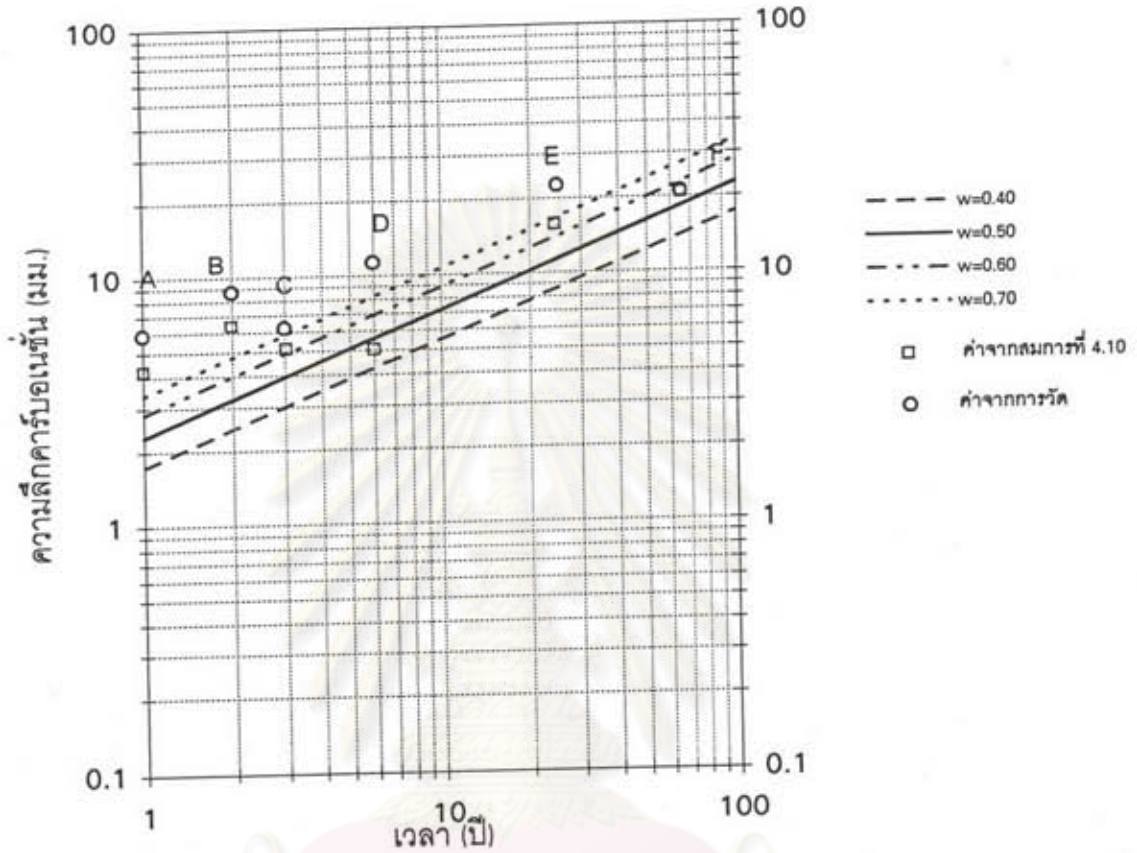
รูปที่ 4.12 ความลึกคาร์บอนเนชันวัดได้จากสะพานตัวอย่าง เทียบกับสมการที่ 2.30 และ 2.31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



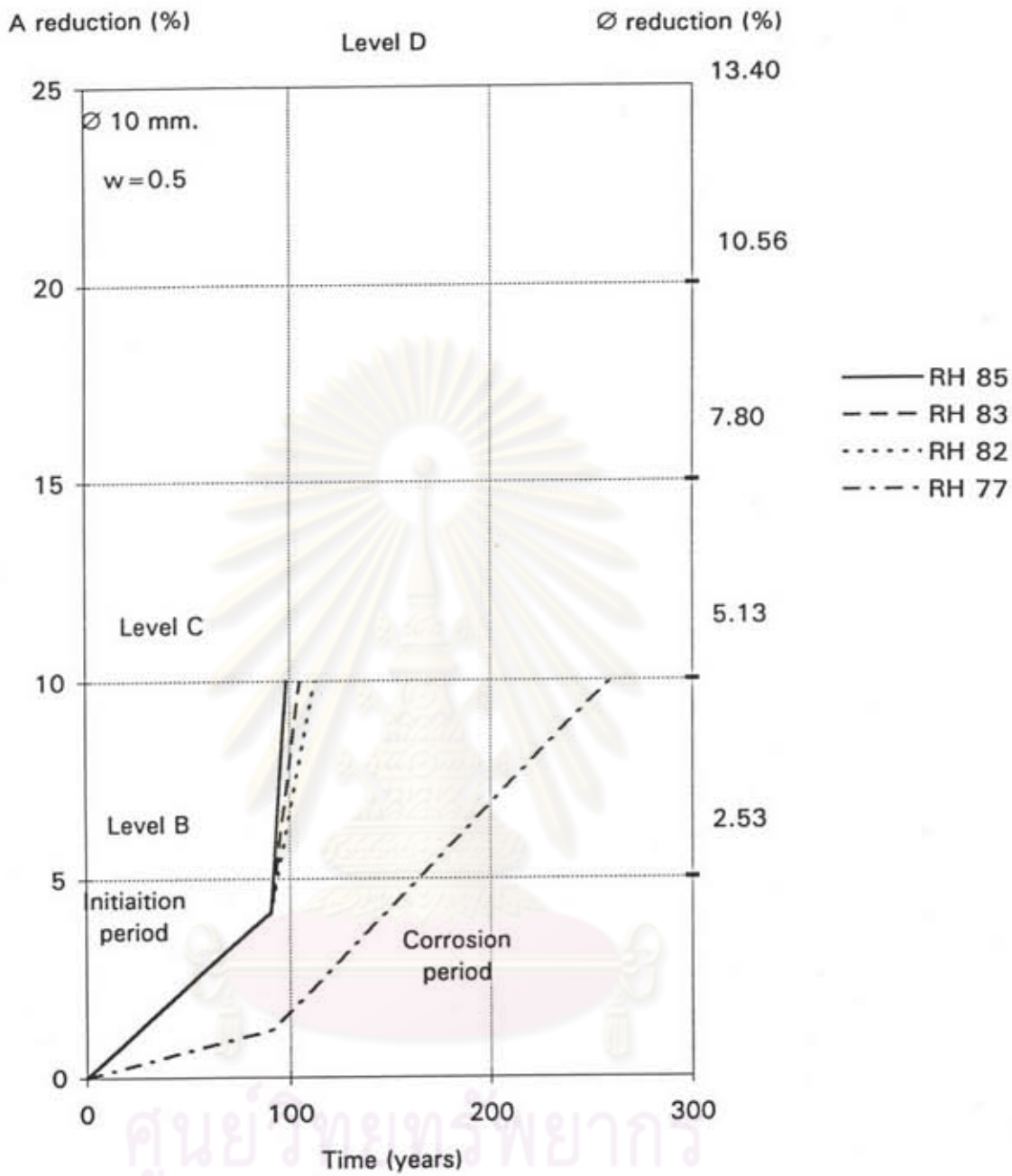
รูปที่ 4.13 ความลึกคาร์บอนเนชันวัดได้จากสะพานตัวอย่าง เทียบกับสมการที่ 2.41 (CEB MODEL)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



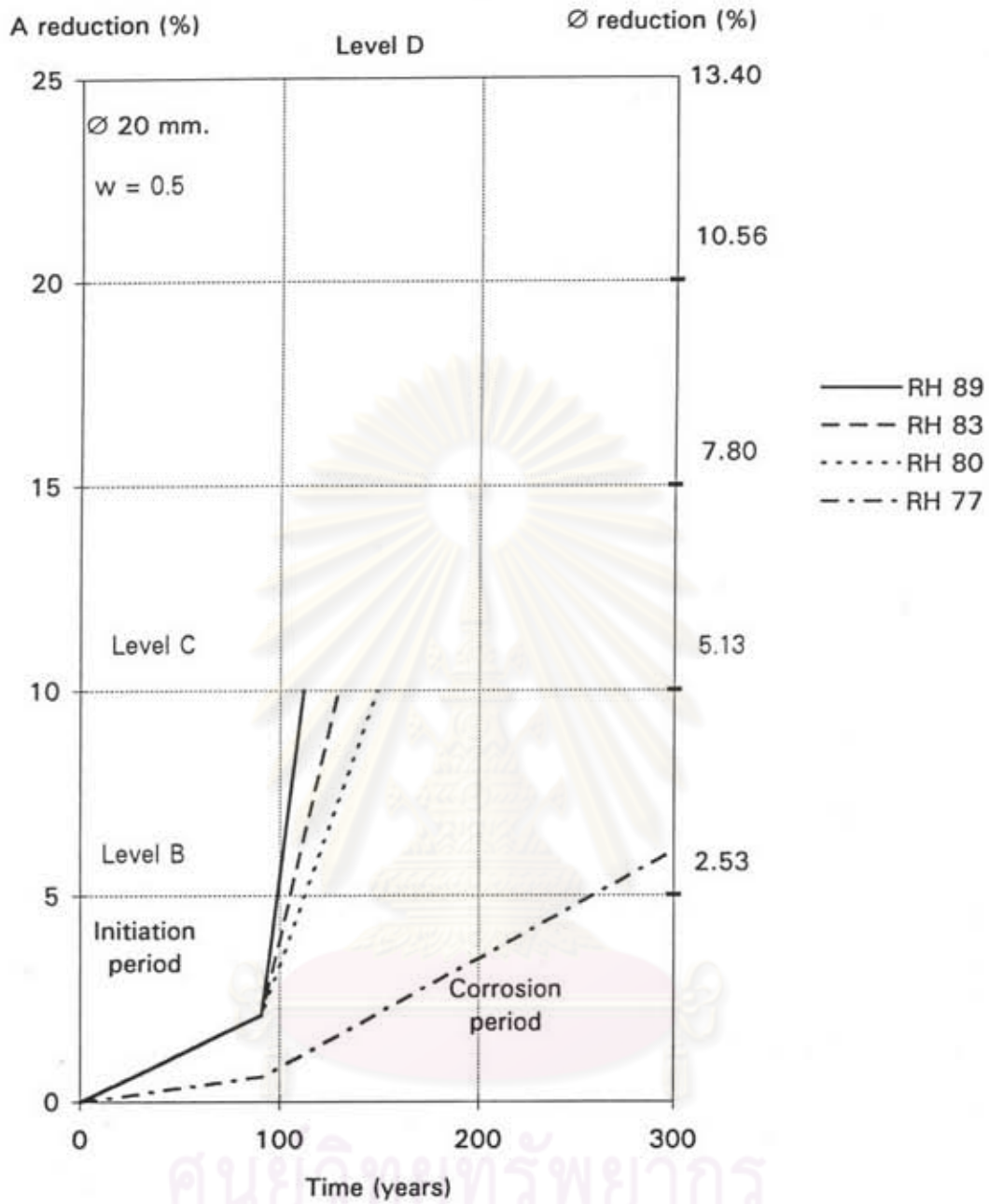
รูปที่ 4.14 ความลึกคาร์บอนเนชั่นวัดได้จากสะพานตัวอย่าง เทียบกับสมการที่ 4.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

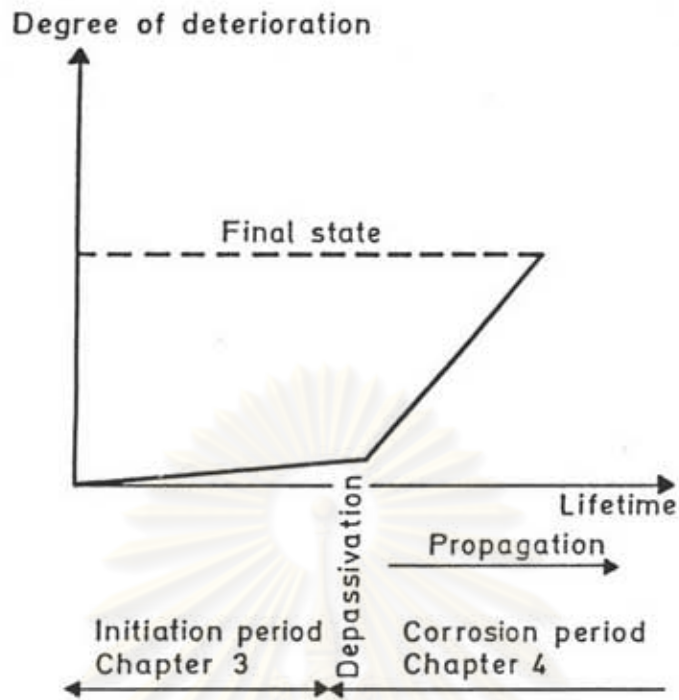


รูปที่ 5.1 อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริม เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. โดยกำหนดช่วงเวลาเริ่มต้น ตามสมการที่ 2.41 (CEB MODEL)

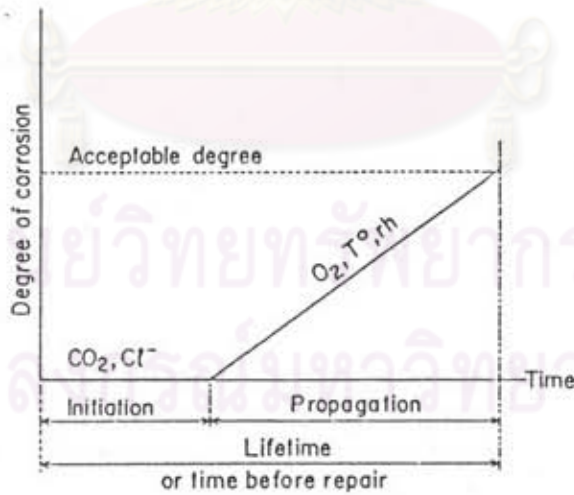




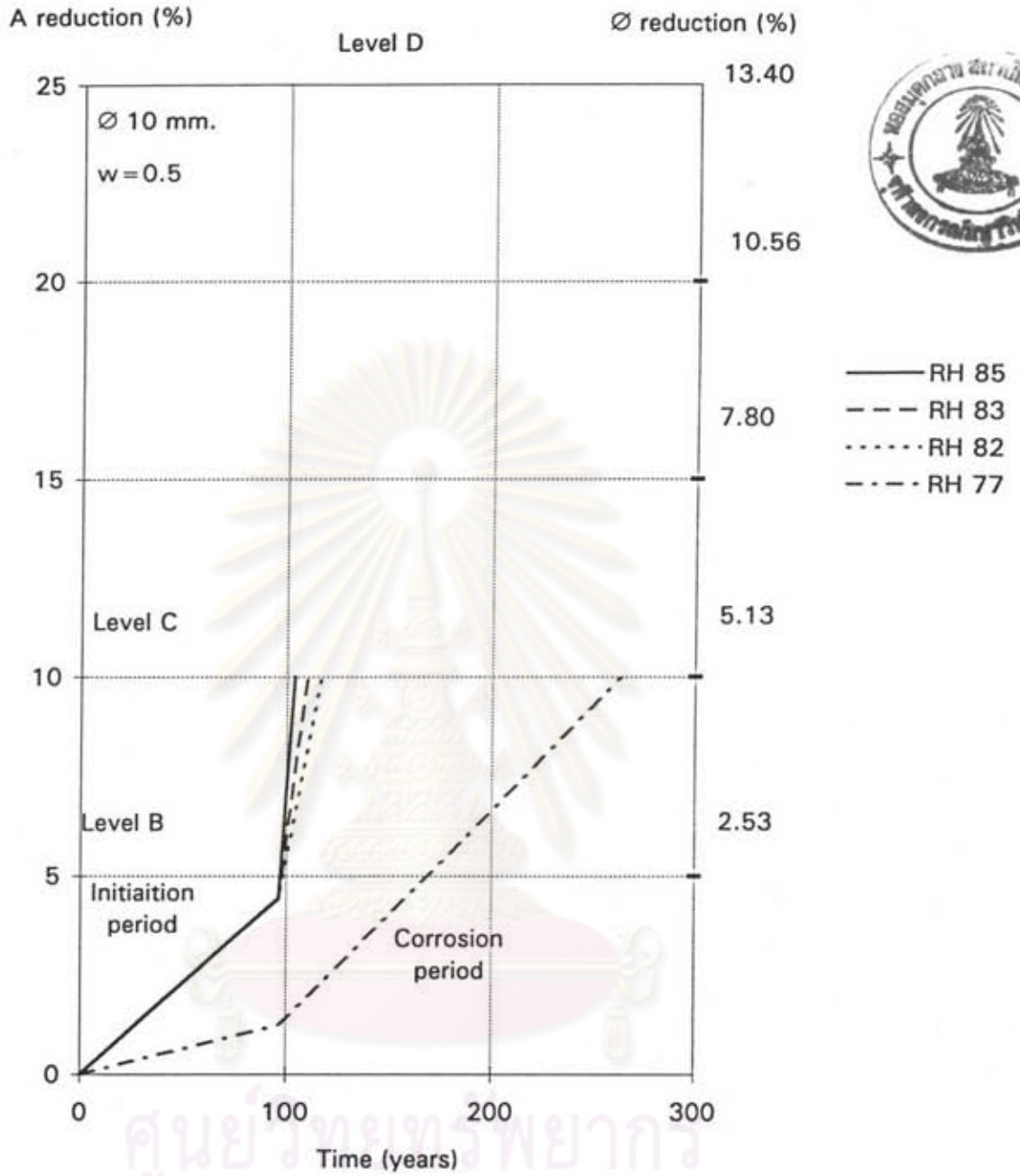
รูปที่ 5.2 อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม. โดยกำหนดช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 2.41 (CEB MODEL )



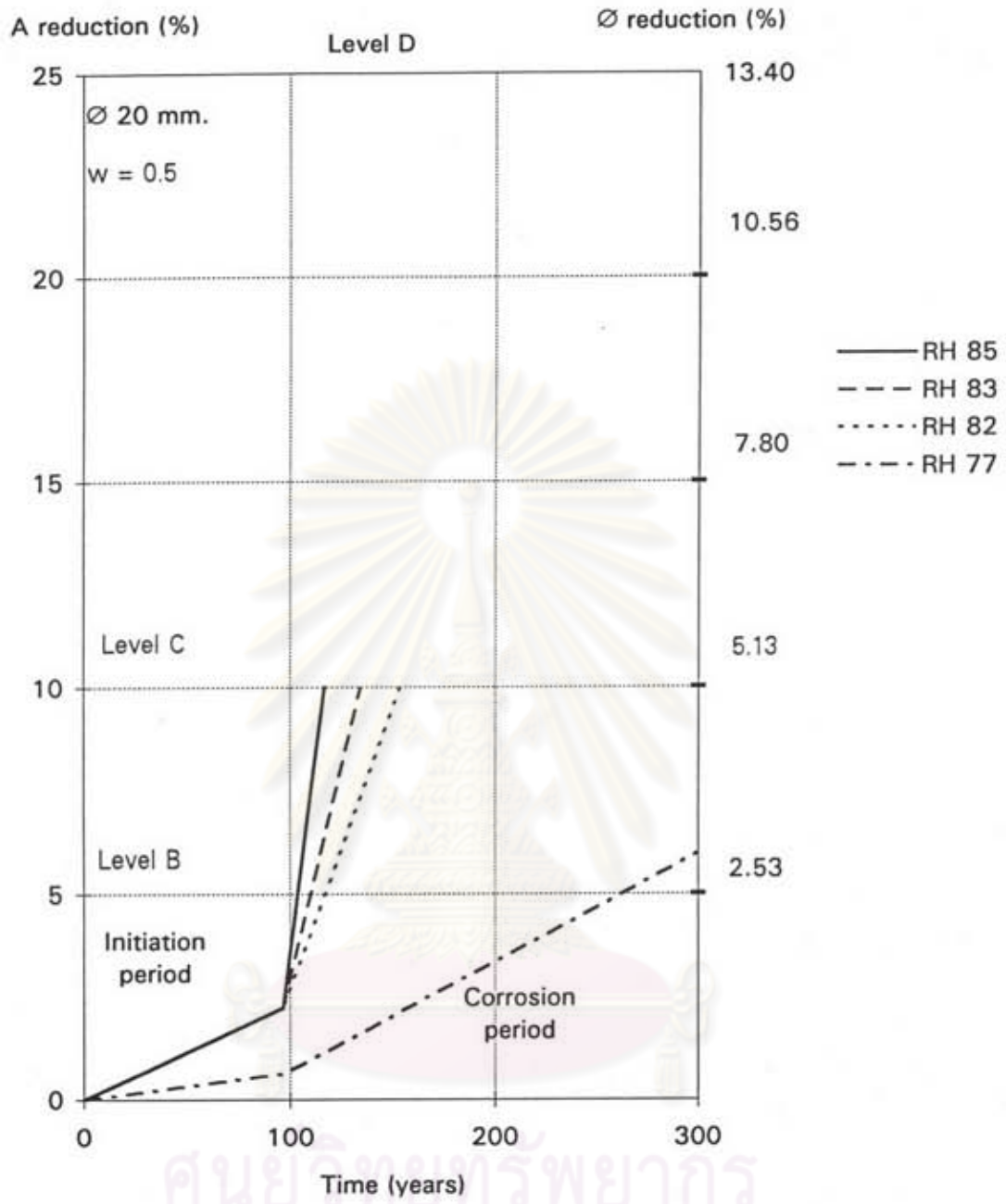
รูปที่ 5.3 แบบจำลองอายุการใช้งานของโครงสร้างเสนาอโดย Treadaway [15]



รูปที่ 5.4 แบบจำลองอายุการใช้งานของโครงสร้างเสนาอโดย Tuutti [6]



รูปที่ 5.5 อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. โดยกำหนดช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 4.10



รูปที่ 5.6 อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. โดยกำหนดช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 4.10





## ประวัติผู้เขียน

นายนิพนธ์ จงพิทักษ์ศีล เกิดเมื่อ 15 พฤศจิกายน พ.ศ.2511 ที่อำเภอบางกอกน้อย จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2533 และเข้าศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2535



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย