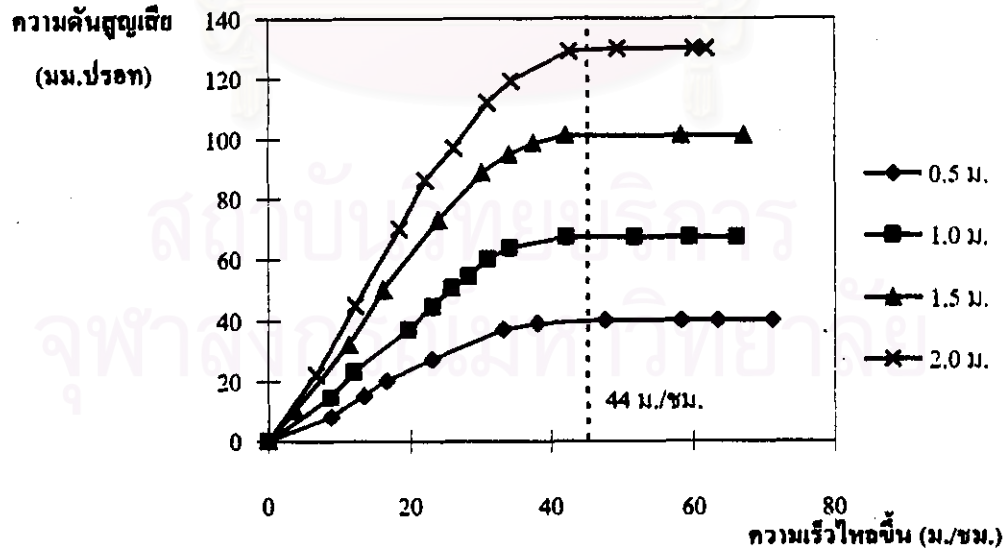
บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะเสมือนของไหลและขั้นตอนการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด

4.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะเสมือนของไหล

การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะเสมือนของไหล ในถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งใช้ทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.85-1.0 มม. ที่ความสูง 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตร โดยปรับความเร็วไหลขึ้นเทียบกับค่าความดันลด ผลที่ได้แสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1 และสามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วของน้ำได้ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วน้ำไหลขึ้นกับความดันสูญเสีย

จากรูปที่ 4.1 ที่ทุกความสูงชั้นทรายที่ทำการทดลอง จะเห็นได้ว่าช่วงแรกเมื่อค่อยๆเพิ่มความเร็วของน้ำทีละน้อย ในระยะแรกทรายยังคงอยู่นิ่ง และความดันลดก็จะเปลี่ยนแปลงไปพร้อมกับความเร็วของน้ำจนถึงระดับหนึ่ง เมื่อทรายเริ่มขยับและแยกตัวเป็นอิสระ ความดันลดของอนุภาคจะลดลงเล็กน้อยและเริ่มคงที่ไม่ว่าจะเพิ่มความเร็วของน้ำเท่าไรก็ตาม ความเร็วของน้ำที่ทำให้ทรายเริ่มขยับตัวและในขณะเดียวกันความดันลดเริ่มคงที่นี้ คือความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะเสมือนของไหล ลักษณะของกราฟจะเหมือนการทดลองของ อัญชลี จันทวรรณกูร (2535) และอัญชลี เจนต์สัมฤทธิ์ (2535) จากการทดลองนี้ เมื่อลากเส้นจากจุดที่ความดันลดมีค่าคงที่มาตัดแกนความเร็วของน้ำ ที่จุดตัดนี้จะเป็นค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะเสมือนของไหล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 44 ม./ชม.ที่ทุกความสูงของชั้นทราย เนื่องจากความเร็วต่ำสุดขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของของไหล และขนาดของอนุภาคเท่านั้น ไม่ขึ้นกับความสูงของชั้นทราย

ในการทดลองขั้นที่ 2 จะใช้ค่าความเร็วน้ำไหลขึ้นเท่ากับ 66 ม./ชม. ซึ่งเป็นความเร็ว 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะเสมือนของไหล ความเร็วนี้มีค่าสูงเมื่อเทียบกับความเร็วในการตกตะกอนของฟลือกของแคลเซียมฟลูออไรด์ ที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนผลึกแล้วตามด้วยกระบวนการไดแอกกูเลชั่น ทำให้ขนาดของถังปฏิกรณ์จะเล็กมากเมื่อเทียบกับกระบวนการตกตะกอนผลึก และเป็นผลให้ระยะเวลาในการเก็บกักในถังปฏิกรณ์สั้นด้วย ซึ่งค่าความเร็วที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับค่าความเร็วที่ใช้ในการทดลองของ อัญชลี จันทวรรณกูร (2535) และอัญชลี เจนต์สัมฤทธิ์ (2535) และค่าความเร็วที่ใช้นี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วที่ใช้ในงานวิจัยของ Wilms และคณะ(1988) และในงานวิจัยของ Janda และ Benesova (1988)

4.2 การกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลการกำจัดฟลูออไรด์ในกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด โดยการทดลองทำที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าเท่ากับ 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. ค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองคือ 7.0, 7.5, 8.0, 8.5 และ 9.0 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH)ปรับพีเอช ความสูงชั้นทรายขณะที่หยุดนิ่ง ซึ่งต่อไปจะเรียกว่าความสูงชั้นทราย คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตร โดยใช้ความเร็วน้ำไหลขึ้นเท่ากับ 66 ม./ชม. ทำการทดลองทั้งสิ้น 100 การทดลอง ผลของค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1 - ข.100 โดยผลการทดลองจะแบ่งเป็นเรื่องหลักๆ 3 เรื่องคือ ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ โดยกระบวนการ

ตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด ความเข้มข้นของฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดและความเข้มข้นของฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านกระบวนการกรองตามหลัง (Post filtration) ซึ่งผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะต่างๆ ของการทดลอง คือ ค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า ค่าพีเอช และค่าความสูงของชั้นทราย ดังนี้

4.2.1.1 ผลของความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า

ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด เนื่องจากกลไกการเกิดผลึกโดยทั่วไปจะมี 2 กลไก คือ กลไกการเกิดนิวคลีเอชัน (Nucleation) และกลไกการเติบโตของผลึก (Growth) แต่กลไกที่ใช้ในกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดนี้คือกลไกการเติบโตของผลึก โดยในการทดลองนี้จะเกิดผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์ขึ้นและจะเกิดการเกาะตัวกันบนอนุภาคที่มีอยู่แล้วในน้ำ ซึ่งก็คือเม็ดทรายที่บรรจุภายในถังปฏิกรณ์ กลไกดังกล่าวเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความอิ่มตัวยิ่งยวดของแคลเซียมฟลูออไรด์ในน้ำมีค่าไม่สูงจนเกินไป แต่ในกรณีที่ความอิ่มตัวยิ่งยวดของแคลเซียมฟลูออไรด์ในน้ำมีค่าสูงเกินไป จะเกิดกลไกการเกิดนิวคลีเอชันและการเติบโตของผลึกพร้อมๆกันแทน โดยมีกลไกการเกิดนิวคลีเอชันเป็นกลไกเด่น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Spontaneous nucleation โดยจะทำให้มีผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์ขนาดเล็กๆจำนวนมากในน้ำแทนที่จะเกาะตัวบนเม็ดทราย เป็นผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดต่ำลงและมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำสูง

จากตารางที่ 4.1 - 4.4 และรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงค่าประสิทธิภาพของการกำจัดฟลูออไรด์ พบว่าผลของการทดลองที่ค่าความสูงชั้นทราย 2 เมตร และพีเอช 7.5 เมื่อความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าเป็น 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. จะได้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ร้อยละ 74.0, 80.5, 76.0, 42.0 และ 31.3 ตามลำดับ โดยค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์จะดีเฉพาะในช่วงความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50 - 200 มก./ล. และค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์สูงสุดจะเกิดที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 100 มก./ล. โดยมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ร้อยละ 80.5 ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดภายใต้สภาวะการทดลองครั้งนี้ ทั้งนี้เนื่องจากจะเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวดของแคลเซียมฟลูออไรด์ในจุดที่เหมาะสม ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่กลไกการเติบโตของผลึกเป็นกลไกเด่น หรือที่เรียกว่า Heterogeneous nucleation ซึ่งเป็นกลไกที่เหมาะสมต่อกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด

สำหรับที่ค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 300 และ 400 มก./ล. พบว่ามีค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ต่ำคือมีค่าเพียงร้อยละ 42 และ 31.3 ตามลำดับ เนื่องจากความอิ่มตัวยิ่งยวดของแคลเซียมฟลูออไรด์ในน้ำสูงเกินไป ทำให้เกิดการตกผลึกโดยกลไกการเกิดนิวคลีเอชัน เป็นผลให้แคลเซียมฟลูออไรด์ไม่มีการเติบโตบนผลึกที่มีอยู่แล้ว แต่จะเกิดเป็นผลึกเม็ดเล็กๆ จำนวนมากในน้ำหรือที่เรียกว่าปรากฏการณ์ Spontaneous nucleation ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ควรหลีกเลี่ยงสำหรับกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดนี้ เช่นเดียวกับอ้างถึงในการทดลองของ Wilms และคณะ (1988) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์น้ำเข้าในช่วง 50 - 200 มก./ล. จะเกิด Spontaneous nucleation น้อยกว่าที่ค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์น้ำเข้า 300 และ 400 มก./ล. โดยดูผลจากความเข้มข้นฟลูออไรด์คงเหลือและค่าของแข็งแขวนลอยต่ำ นั่นคือที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์มากกว่า 300 มก./ล.ไม่เหมาะต่อการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดภายใต้สภาวะการทดลองนี้ แต่เนื่องมาจากความยืดหยุ่นของกระบวนการนี้ คือสามารถหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมาทำการเจือจางกับน้ำเข้าที่มีความเข้มข้นสูงได้ โดยเพิ่มเครื่องสูบน้ำหมุนเวียนอีก 1 ชุด ดังนั้นเมื่อมีความเข้มข้นฟลูออไรด์มากกว่า 300 มก./ล. จึงควรทำการเจือจางก่อนโดยผสมน้ำเข้ากับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

ตารางที่ 4.1 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึก และปริมาณฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรองที่ความสูงของชั้นทราย 0.5 เมตร

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรอง(มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการตกผลึก(%)
50	7.0	17.1	65.8
50	7.5	15.2	69.6
50	8.0	16.1	67.8
50	8.5	20.2	59.6
50	9.0	25.4	49.2
100	7.0	28.2	71.8
100	7.5	25.8	74.2
100	8.0	27.1	72.9
100	8.5	32.4	67.6
100	9.0	37.8	62.2
200	7.0	62.4	68.8
200	7.5	60.1	70.0
200	8.0	63.5	68.3
200	8.5	73.8	63.1
200	9.0	78.0	61.0
300	7.0	198	34.0
300	7.5	189	37.0
300	8.0	201	33.0
300	8.5	207	31.0
300	9.0	213	29.0
400	7.0	350	12.5
400	7.5	338	15.5
400	8.0	360	10.0
400	8.5	362	9.5
400	9.0	368	8.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึกและปริมาณฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรองที่ความสูงของชั้นทราย 1.0 เมตร

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรอง(มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการตกผลึก(%)
50	7.0	14.3	71.4
50	7.5	13.9	72.2
50	8.0	16.8	66.4
50	8.5	18.1	63.8
50	9.0	23.9	52.2
100	7.0	25.4	74.6
100	7.5	25.0	75.0
100	8.0	26.9	73.1
100	8.5	31.2	68.8
100	9.0	34.8	65.2
200	7.0	53.1	73.5
200	7.5	50.0	75.0
200	8.0	54.4	72.8
200	8.5	60.8	69.6
200	9.0	72.2	63.9
300	7.0	187	37.7
300	7.5	184	38.7
300	8.0	190	36.7
300	8.5	204	32.0
300	9.0	214	28.7
400	7.0	350	12.5
400	7.5	340	15.0
400	8.0	352	12.0
400	8.5	360	10.0
400	9.0	363	9.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

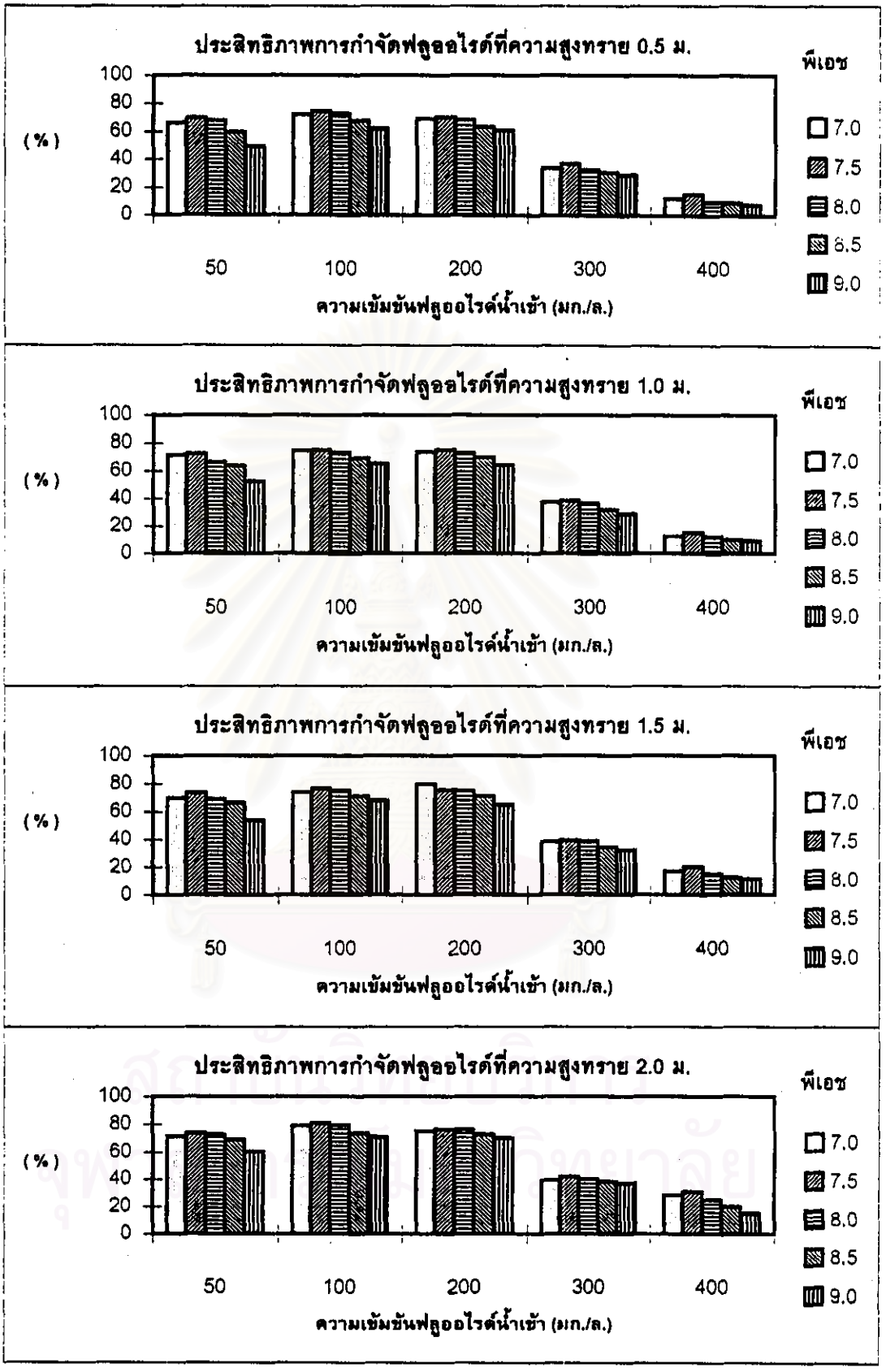
ตารางที่ 4.3 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึก และปริมาณฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรองที่ความสูงของชั้นทราย 1.5 เมตร

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรอง(มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการตกผลึก(%)
50	7.0	15.0	70.0
50	7.5	13.2	73.6
50	8.0	15.5	69.0
50	8.5	16.7	66.6
50	9.0	23.0	54.0
100	7.0	26.0	74.0
100	7.5	23.5	65.5
100	8.0	24.9	75.1
100	8.5	29.2	70.8
100	9.0	32.0	68.0
200	7.0	50.8	79.6
200	7.5	48.9	75.6
200	8.0	50.0	75.0
200	8.5	58.3	70.9
200	9.0	70.1	65.0
300	7.0	185	38.3
300	7.5	182	39.3
300	8.0	183	39.0
300	8.5	197	34.3
300	9.0	204	32.0
400	7.0	332	17.0
400	7.5	320	20.0
400	8.0	340	15.0
400	8.5	350	12.5
400	9.0	355	11.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึก และปริมาณฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรองที่ความสูงของชั้นทราย 2.0 เมตร

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรอง(มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการตกผลึก(%)
50	7.0	14.4	71.2
50	7.5	13.0	74.0
50	8.0	13.6	72.8
50	8.5	15.5	69.0
50	9.0	19.8	60.4
100	7.0	21.2	78.8
100	7.5	19.5	80.5
100	8.0	21.0	79.0
100	8.5	26.6	73.4
100	9.0	29.2	70.8
200	7.0	50.2	74.9
200	7.5	48.1	76.0
200	8.0	48.0	76.0
200	8.5	54.5	72.8
200	9.0	59.8	70.1
300	7.0	182	39.3
300	7.5	174	42.0
300	8.0	180	40.0
300	8.5	185	38.3
300	9.0	189	37.0
400	7.0	286	28.5
400	7.5	275	31.3
400	8.0	300	25.0
400	8.5	320	20.0
400	9.0	340	15.0



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับความเข้มข้นฟลูออไรด์น้ำเข้า ที่สภาวะต่าง ๆ

ผลของการปรับความเข้มข้นฟลูออไรด์ต่อค่าของแข็งแขวนลอย พบว่าของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นจากแคลเซียมฟลูออไรด์และแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งไม่เกาะเป็นผลึกแข็งบนเม็ดทรายของแข็งแขวนลอยดังกล่าวเป็นผลจากการเกิดปรากฏการณ์ Spontaneous nucleation โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5-4.8 และรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าของแข็งแขวนลอยหลังจากการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. พีเอช 7.5 และความสูงของชั้นทราย 2.0 ม. มีค่าเท่ากับ 9, 22, 91, 368 และ 640 มก./ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกยังมีค่าสูงอยู่ จึงจำเป็นต้องทำการกำจัดของแข็งแขวนลอยออกโดยกระบวนการกรองต่อไป

ผลของการปรับความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้ากับค่าความเป็นด่าง แสดงในตารางที่ 4.9 - 4.12 และรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นด่างจะลดลงเมื่อความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้ามีค่าสูงขึ้น โดยลดลงจากค่าความเป็นด่างเริ่มต้นในน้ำเข้าซึ่งมีค่าประมาณ 85 มก./ล. หินปูน จนเหลือต่ำสุดประมาณ 23-25 มก./ล. หินปูน ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าที่มากกว่า 100 มก./ล. และพีเอช 9.0 เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้ามีค่าสูงขึ้น จะต้องเพิ่มปริมาณของแคลเซียมที่ใช้จับฟลูออไรด์ด้วย จึงมีปริมาณแคลเซียมเหลือส่วนหนึ่ง ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้น ทำให้ปริมาณคาร์บอเนตในน้ำลดลงและเป็นผลให้ค่าความเป็นด่างในน้ำลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ Graveland และคณะ(1983) และการศึกษาของ Harms และ Robinson (1992)

ผลของการปรับค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้ากับค่าความกระด้างทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4.9 - 4.12 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความกระด้างในน้ำจะเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยค่าความกระด้างในน้ำประปาที่นำมาผสมเป็นน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าประมาณ 110 มก./ล.หินปูน และค่าความกระด้างภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. จะมีค่าอยู่ในช่วง 108-135, 186-212, 285-324, 372-408 และ 492-586 มก./ล. หินปูน ตามลำดับ ซึ่งค่าความกระด้างที่เพิ่มขึ้นมานี้ เกิดขึ้นจากการเติมแคลเซียมในปริมาณที่มากเกินความต้องการ คือไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของจุดสตอยชิโอเมตริก เพื่อต้องการให้ประสิทธิภาพเกิดผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์มีค่าสูง โดยที่ค่าความกระด้างคงเหลือนี้จะแปรผันตามความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า

ตารางที่ 4.5 ค่าของแข็งแขวนลอยภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้นทราย 0.5 ม.

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ค่าของแข็งแขวนลอยก่อนการกรอง(มก./ล.)	ค่าของแข็งแขวนลอยหลังผ่านการกรอง (มก./ล.)
50	7.0	19	< 5
50	7.5	17	< 5
50	8.0	21	< 5
50	8.5	19	< 5
50	9.0	20	< 5
100	7.0	42	< 5
100	7.5	45	< 5
100	8.0	43	< 5
100	8.5	42	< 5
100	9.0	45	< 5
200	7.0	140	30
200	7.5	139	27
200	8.0	135	30
200	8.5	155	35
200	9.0	132	35
300	7.0	409	318
300	7.5	398	320
300	8.0	410	315
300	8.5	396	322
300	9.0	420	318
400	7.0	678	612
400	7.5	690	606
400	8.0	684	610
400	8.5	709	628
400	9.0	702	631

ตารางที่ 4.6 ค่าของแข็งแขวนลอยภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้นทราย 1.0 ม.

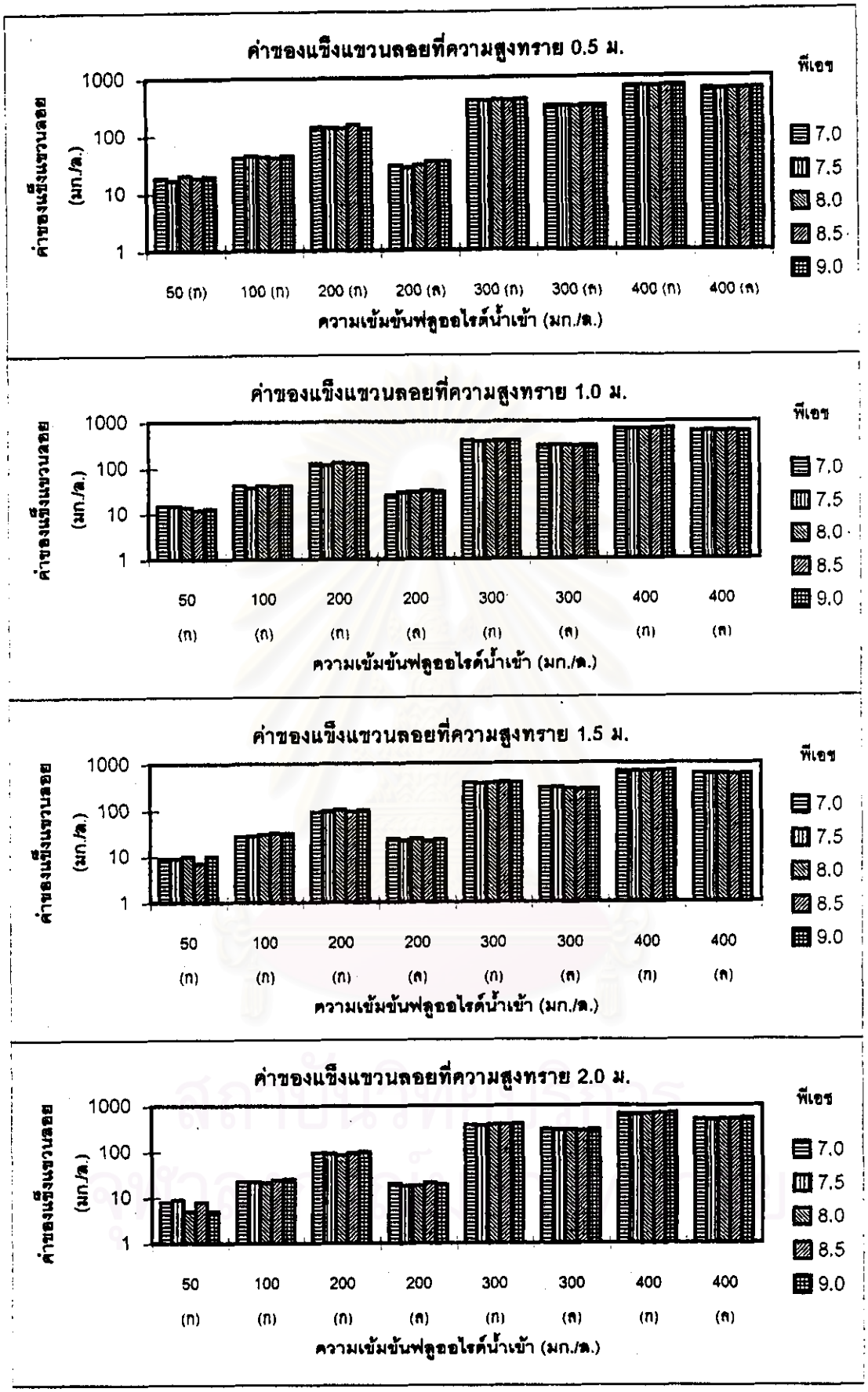
ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ค่าของแข็งแขวนลอยก่อนการกรอง(มก./ล.)	ค่าของแข็งแขวนลอยหลังผ่านการกรอง (มก./ล.)
50	7.0	15	< 5
50	7.5	15	< 5
50	8.0	14	< 5
50	8.5	12	< 5
50	9.0	13	< 5
100	7.0	42	< 5
100	7.5	37	< 5
100	8.0	42	< 5
100	8.5	40	< 5
100	9.0	42	< 5
200	7.0	124	25
200	7.5	115	29
200	8.0	130	29
200	8.5	125	32
200	9.0	120	30
300	7.0	395	295
300	7.5	376	302
300	8.0	385	294
300	8.5	380	287
300	9.0	385	289
400	7.0	684	605
400	7.5	675	610
400	8.0	689	596
400	8.5	708	621
400	9.0	693	607

ตารางที่ 4.7 ค่าของแข็งแขวนลอยภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้นทราย 1.5 ม.

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ค่าของแข็งแขวนลอยก่อนการกรอง(มก./ล.)	ค่าของแข็งแขวนลอยหลังผ่านการกรอง (มก./ล.)
50	7.0	9	< 5
50	7.5	9	< 5
50	8.0	10	< 5
50	8.5	7	< 5
50	9.0	10	< 5
100	7.0	27	< 5
100	7.5	28	< 5
100	8.0	30	< 5
100	8.5	32	< 5
100	9.0	32	< 5
200	7.0	27	24
200	7.5	28	22
200	8.0	30	24
200	8.5	32	21
200	9.0	32	23
300	7.0	387	300
300	7.5	380	310
300	8.0	390	286
300	8.5	402	276
300	9.0	389	279
400	7.0	377	590
400	7.5	368	588
400	8.0	388	580
400	8.5	395	574
400	9.0	402	583

ตารางที่ 4.8 ค่าของแข็งแขวนลอยภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้นทราย 2.0 ม.

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ค่าของแข็งแขวนลอยก่อนการกรอง(มก./ล.)	ค่าของแข็งแขวนลอยหลังผ่านการกรอง (มก./ล.)
50	7.0	8	< 5
50	7.5	9	< 5
50	8.0	5	< 5
50	8.5	8	< 5
50	9.0	5	< 5
100	7.0	22	< 5
100	7.5	22	< 5
100	8.0	21	< 5
100	8.5	24	< 5
100	9.0	25	< 5
200	7.0	95	20
200	7.5	91	18
200	8.0	85	18
200	8.5	94	21
200	9.0	98	19
300	7.0	377	302
300	7.5	368	295
300	8.0	388	298
300	8.5	395	280
300	9.0	402	294
400	7.0	649	485
400	7.5	640	480
400	8.0	655	496
400	8.5	684	502
400	9.0	690	532



หมายเหตุ (ก) = ก่อนกรอง (ล) = หลังกรอง

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์กับความเข้มข้นน้ำเข้าที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่ 4.9 ค่าความเป็นด่างและค่าความกระด้างทั้งหมดภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้น ทราย 0.5 เมตร

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ค่าความเป็นด่าง (มก./ล. หินปูน)	ค่าความกระด้าง (มก./ล. หินปูน)
50	7.0	85	128
50	7.5	85	125
50	8.0	57	130
50	8.5	40	128
50	9.0	35	124
100	7.0	83	200
100	7.5	66	204
100	8.0	45	186
100	8.5	32	195
100	9.0	26	204
200	7.0	80	295
200	7.5	47	310
200	8.0	28	275
200	8.5	26	290
200	9.0	24	310
300	7.0	58	402
300	7.5	33	392
300	8.0	26	387
300	8.5	25	402
300	9.0	23	384
400	7.0	43	575
400	7.5	28	586
400	8.0	25	562
400	8.5	24	568
400	9.0	23	520

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ค่าความเป็นด่างและค่าความกระด้างทั้งหมดภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้น ทราย 1.0 เมตร

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ค่าความเป็นด่าง (มก./ล. หินปูน)	ค่าความกระด้าง (มก./ล. หินปูน)
50	7.0	83	115
50	7.5	80	122
50	8.0	60	108
50	8.5	45	115
50	9.0	38	110
100	7.0	80	198
100	7.5	59	185
100	8.0	42	204
100	8.5	35	200
100	9.0	28	196
200	7.0	75	312
200	7.5	42	305
200	8.0	30	302
200	8.5	28	295
200	9.0	26	285
300	7.0	55	380
300	7.5	35	388
300	8.0	30	372
300	8.5	26	393
300	9.0	24	382
400	7.0	41	550
400	7.5	30	548
400	8.0	28	527
400	8.5	26	520
400	9.0	23	505

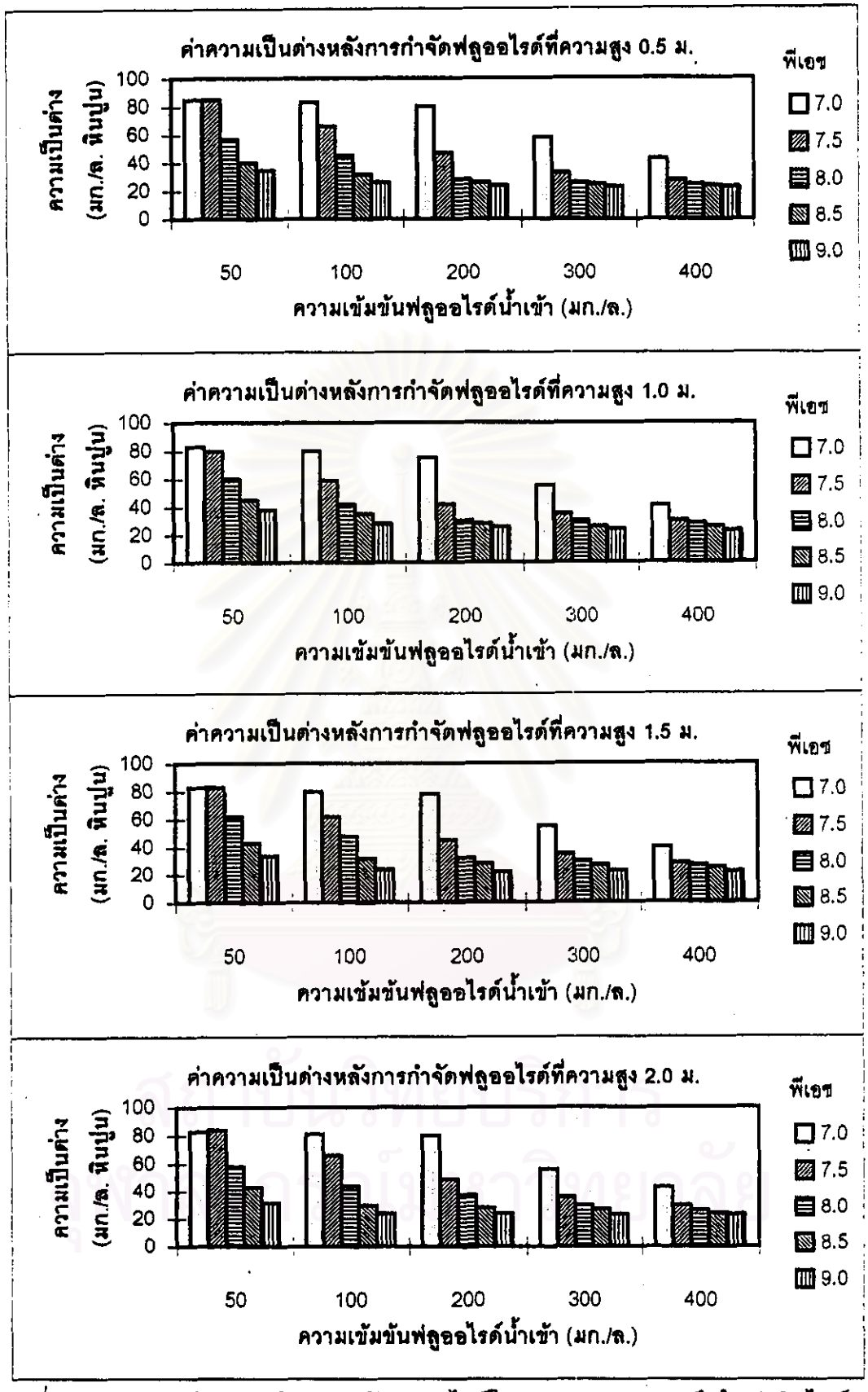
ตารางที่ 4.11 ค่าความเป็นด่างและค่าความกระด้างทั้งหมดภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้น ทราย 1.5 เมตร

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ค่าความเป็นด่าง (มก./ล. หินปูน)	ค่าความกระด้าง (มก./ล. หินปูน)
50	7.0	83	130
50	7.5	83	132
50	8.0	62	125
50	8.5	43	120
50	9.0	34	120
100	7.0	80	200
100	7.5	62	208
100	8.0	48	204
100	8.5	32	204
100	9.0	24	196
200	7.0	78	310
200	7.5	45	308
200	8.0	32	305
200	8.5	28	285
200	9.0	22	320
300	7.0	55	402
300	7.5	35	406
300	8.0	30	398
300	8.5	27	386
300	9.0	23	378
400	7.0	40	566
400	7.5	28	574
400	8.0	27	569
400	8.5	25	534
400	9.0	22	524

ตารางที่ 4.12 ค่าความเป็นด่างและค่าความกระด้างทั้งหมดภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้น ทราย 2.0 เมตร

ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า (มก./ล.)	พีเอช	ค่าความเป็นด่าง (มก./ล. หินปูน)	ค่าความกระด้าง (มก./ล. หินปูน)
50	7.0	83	130
50	7.5	84	128
50	8.0	58	120
50	8.5	43	135
50	9.0	32	125
100	7.0	81	205
100	7.5	66	200
100	8.0	44	212
100	8.5	30	204
100	9.0	24	200
200	7.0	80	311
200	7.5	49	300
200	8.0	37	316
200	8.5	28	324
200	9.0	24	288
300	7.0	56	408
300	7.5	36	392
300	8.0	30	406
300	8.5	27	400
300	9.0	23	386
400	7.0	43	511
400	7.5	30	508
400	8.0	26	521
400	8.5	24	515
400	9.0	23	492

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



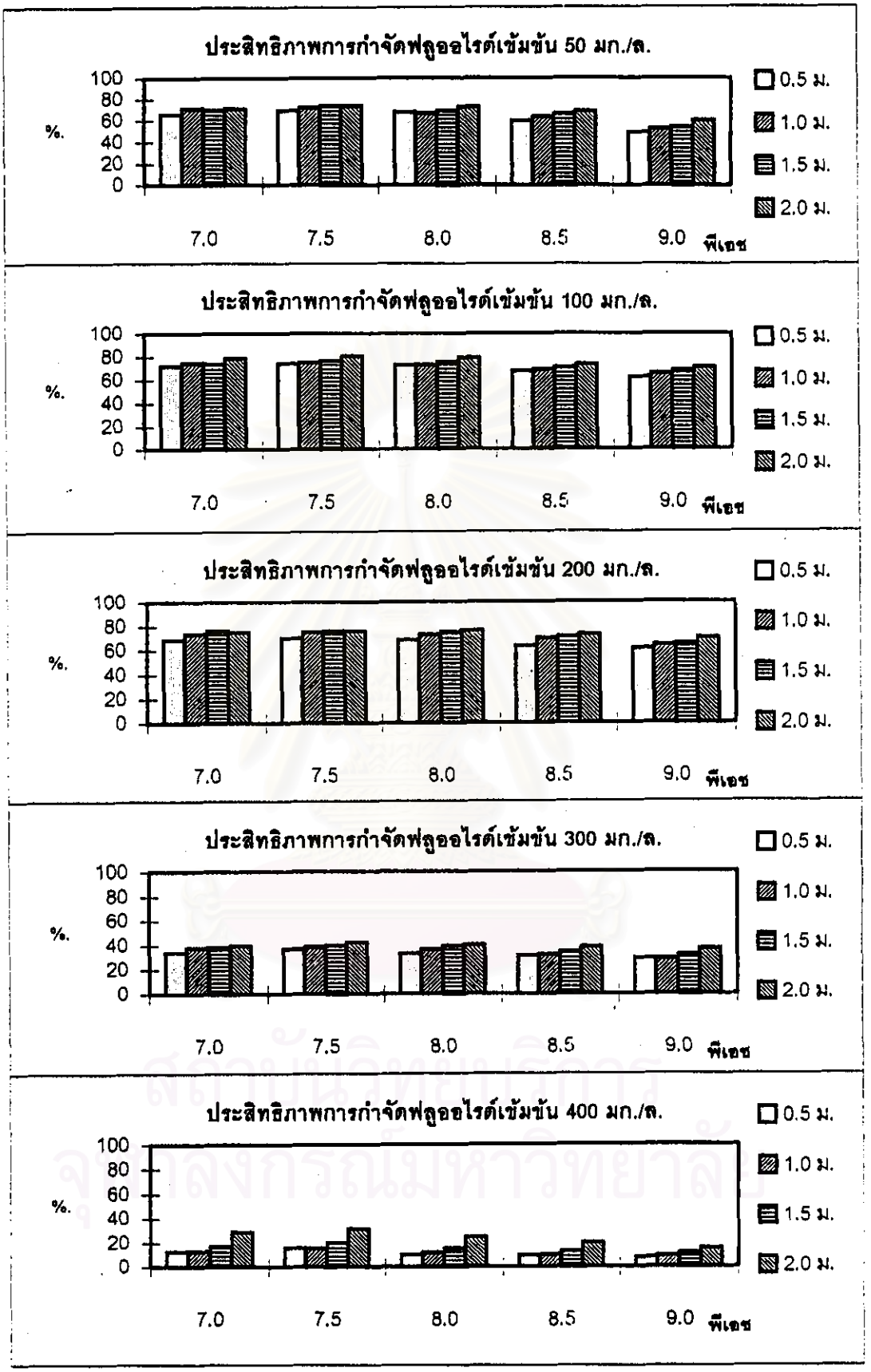
รูปที่ 4.4 ค่าความเป็นด่างหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด

4.2.1.2 ผลของการปรับพีเอช

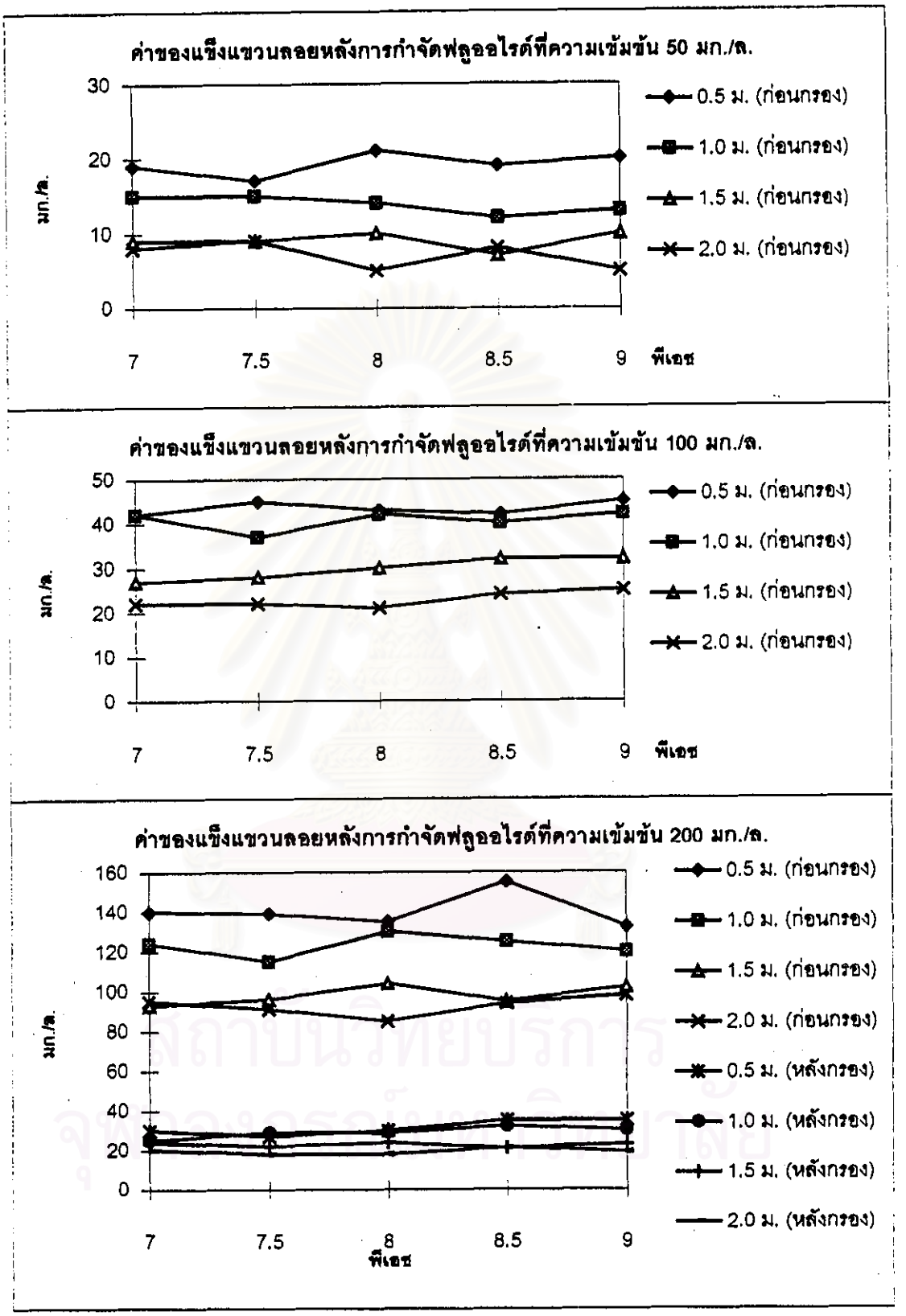
เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำและการตกผลึกของแคลเซียมฟลูออไรด์มีค่าไม่เท่ากันที่ค่าพีเอชต่างๆ ดังนั้นค่าพีเอชจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดด้วย ซึ่งจากตารางที่ 4.1 - 4.4 และรูปที่ 4.2 และ 4.5 จะแสดงค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์เทียบกับค่าพีเอช ซึ่งพบว่าค่าพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ดีที่สุดในการทดลองนี้ คือที่พีเอช 7.5 ที่ทุกความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกตะกอนผลึกธรรมดา พบว่าค่าพีเอชที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าวจะอยู่ที่ 8.5 (Degremont, 1991) จึงกล่าวได้ว่าการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดนั้นจะใช้ค่าพีเอชต่ำกว่าการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกตะกอนผลึกธรรมดา ทำให้สามารถประหยัดค่าสารเคมีได้มากกว่า ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้จะสอดคล้องกับการศึกษาของ Graveland และคณะ (1983) ทั้งนี้จากรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงค่าประสิทธิภาพเทียบกับพีเอช จะเห็นได้ว่าการปรับพีเอชในช่วง 7-8 ที่ค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50-200 มก./ล. ให้ผลของค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ไม่ต่างกันมาก กล่าวคือ ที่ค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100 และ 200 มก./ล. จะได้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูง 2 ม. อยู่ในช่วงร้อยละ 71.2 - 74.0, 78.8 - 80.5 และ 74.9 - 76.0 ตามลำดับ แสดงว่าระบบนี้มีความยืดหยุ่นต่อการปรับพีเอช ทำให้การควบคุมพีเอชในการทำงานไม่ต้องการความละเอียดมาก เป็นผลให้ง่ายต่อการควบคุมดูแลระบบ

ผลของการปรับพีเอชกับค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออก แสดงดังตารางที่ 4.5 - 4.8 และรูปที่ 4.6-4.7 จะเห็นว่าค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 7-9 ไม่มีผลต่อค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออก พบว่าค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจะแกว่งตัวขึ้นลงอยู่ในช่วงแคบๆ โดยที่ค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. ที่ความสูงชั้นทราย 2 ม. จะได้ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกอยู่ในช่วง 5 - 9, 21 - 25, 85 - 98, 368 - 402 และ 640 - 690 มก./ล. ตามลำดับ

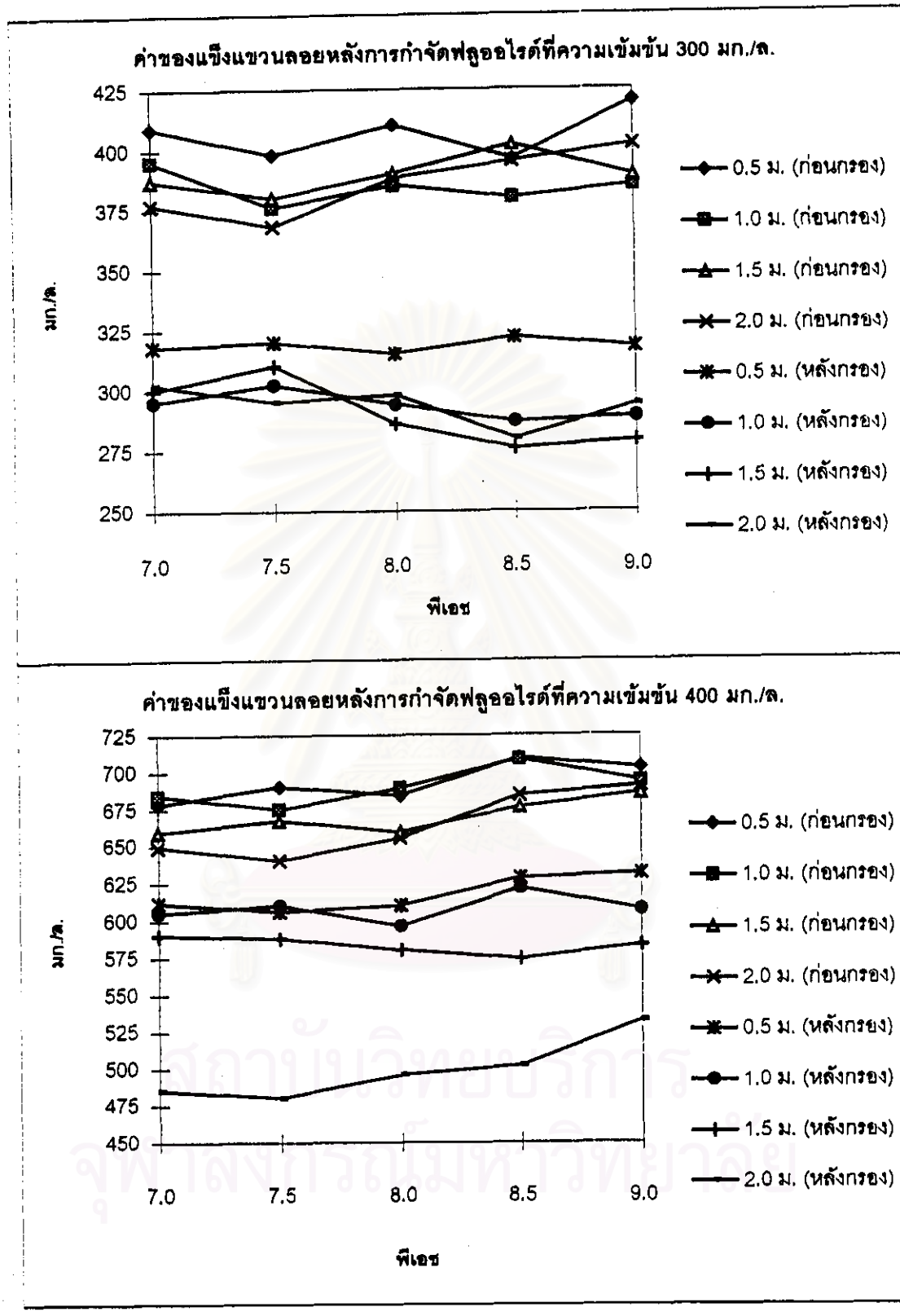
ผลของการปรับค่าพีเอชกับความเป็นด่าง จากตารางที่ 4.9 - 4.12 และรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการปรับพีเอชจะมีผลต่อค่าความเป็นด่าง โดยในการทดลองนี้จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารปรับค่าพีเอช และจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับค่าพีเอชในช่วง 7 - 9 เมื่อพีเอชสูงขึ้นจะมีผลให้ค่าความเป็นด่างลดลง เป็นเพราะจะเกิดผลึก



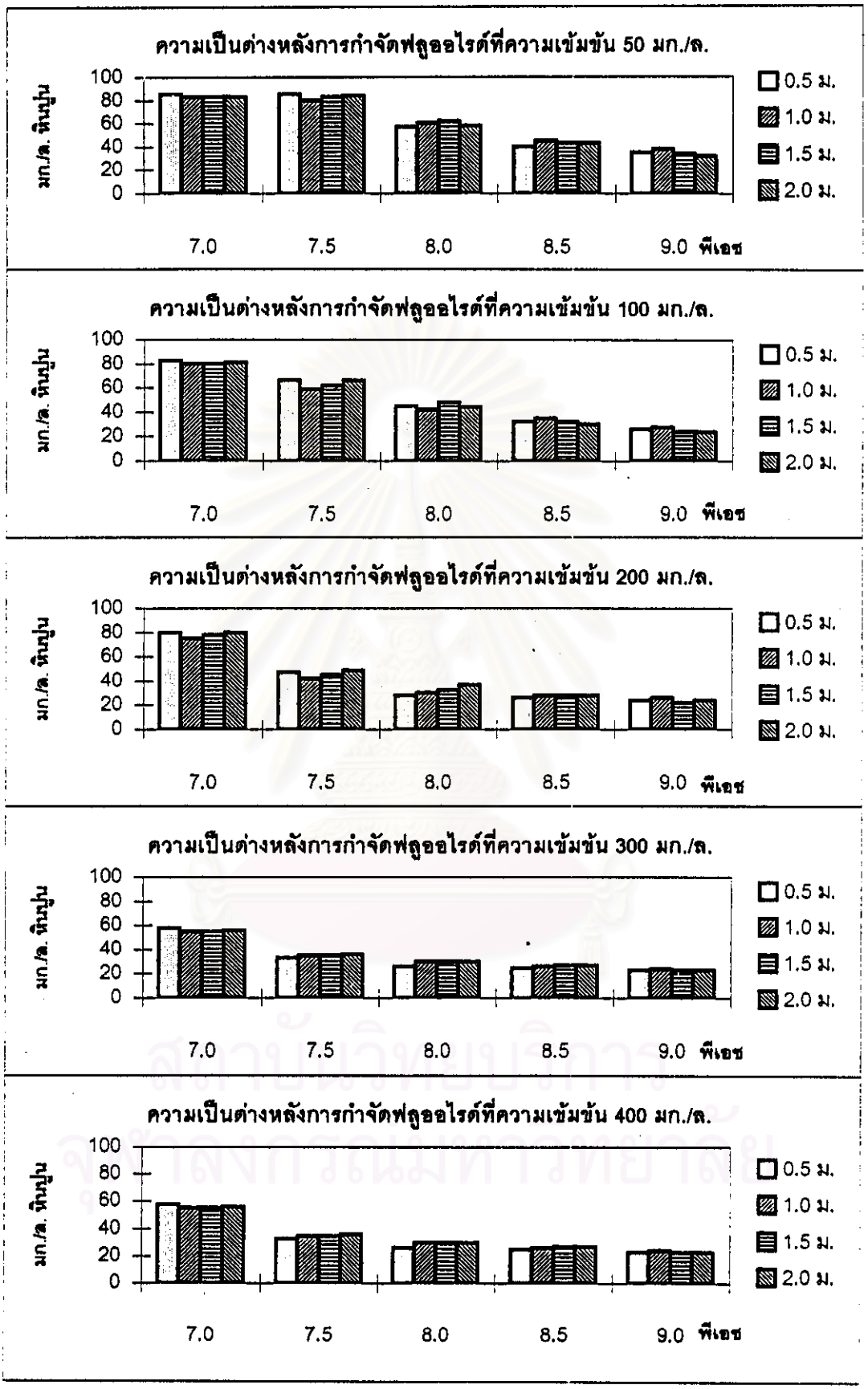
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับค่าพีเอช ที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 มก./ล. ที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเข้มข้น 300 และ 400 มก./ล. ที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบความเป็นด่างหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับค่าพีเอช ที่สภาวะต่างๆ

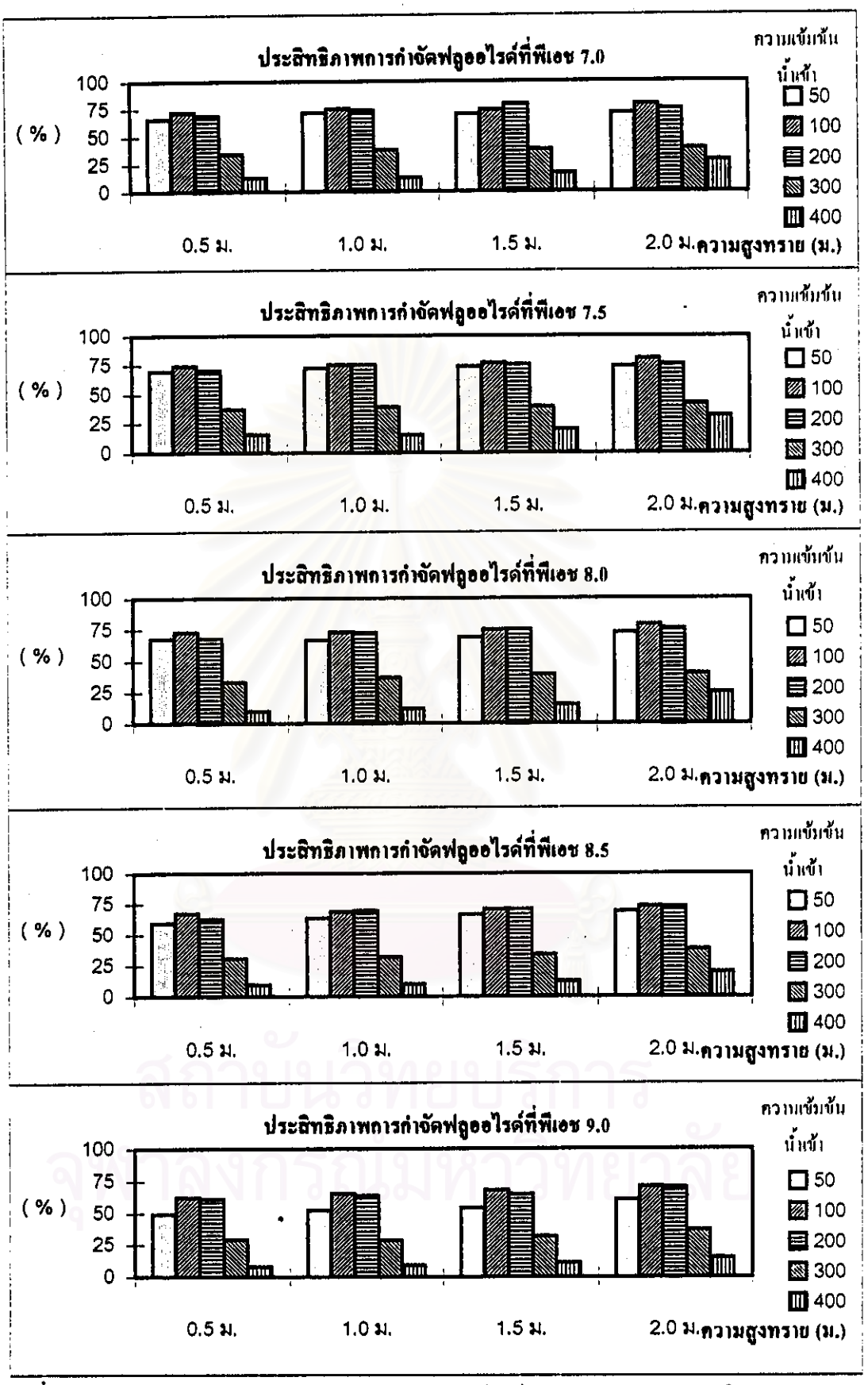
ของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ขึ้นพร้อมๆกับผลึกของแคลเซียมฟลูออไรด์ โดยการเกิดผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดได้ดีเมื่อพีเอชสูงขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาณคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ในน้ำลดลง เป็นผลให้ค่าความเป็นด่างลดลง โดยลดลงมากที่สุดที่ค่าพีเอช 9 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Graveland และคณะ (1983) และการศึกษาของ Harms และ Robinson (1992)

4.2.1.3 ผลของการปรับความสูงของชั้นทราย

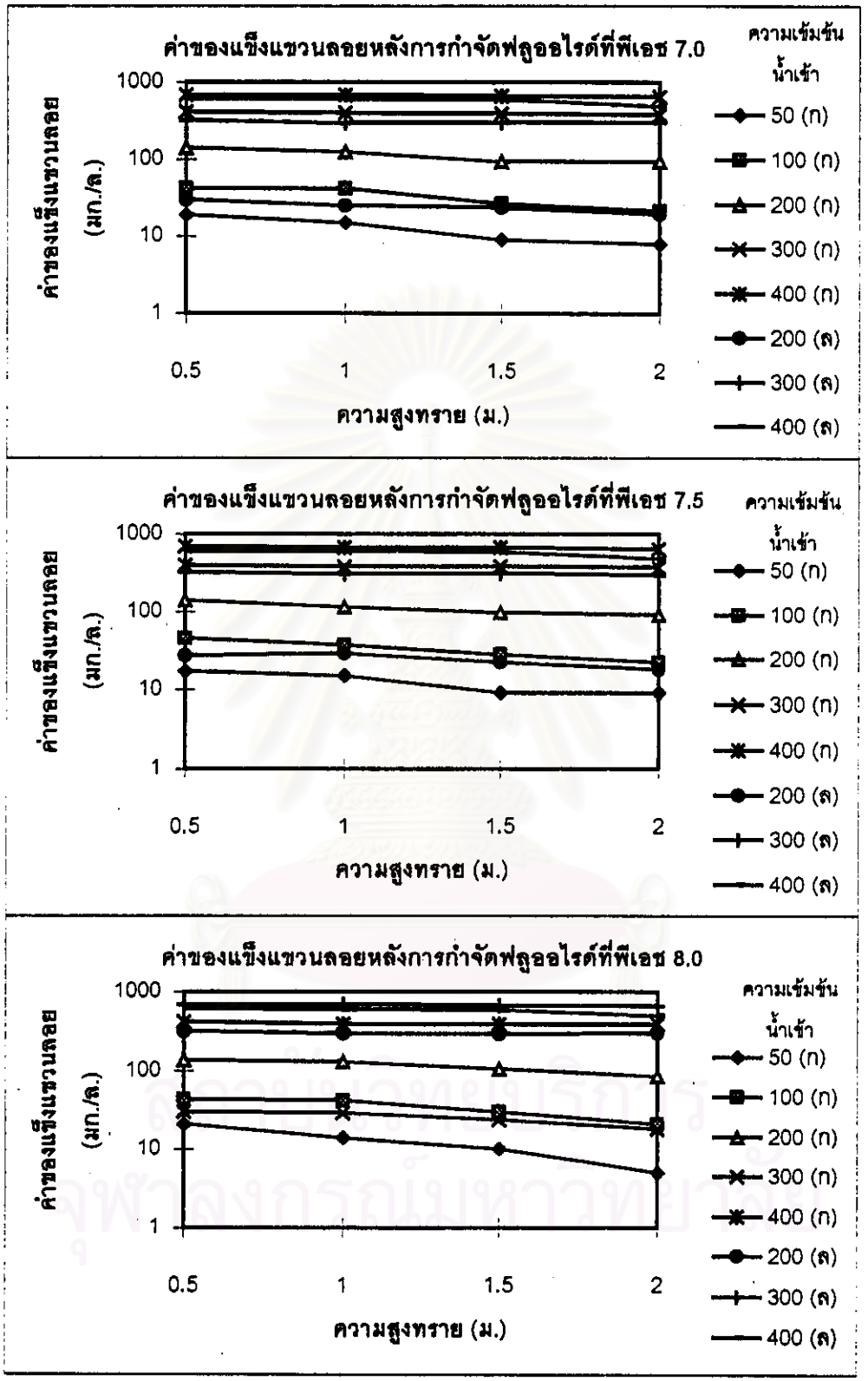
การปรับความสูงของชั้นทรายจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด เนื่องจากการเพิ่มความสูงของชั้นทรายก็หมายถึงการเพิ่มปริมาณและพื้นที่ผิวในการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดด้วย จากตารางที่ 4.3 - 4.4 เมื่อทำการปรับความสูงของชั้นทรายเป็น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ม. โดยวัดความสูงขณะชั้นทรายหยุดนิ่งเป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ พบว่าที่ความสูง 2.0 ม. มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์มากที่สุด คือ มีค่าร้อยละ 74, 80.5, 76.0, 42 และ 31.3 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้าที่ 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. และพีเอช 7.5 ดังรูปที่ 4.9 และมีค่าของแข็งแขวนลอยต่ำสุด ดังรูปที่ 4.10-4.11 โดยค่าของแข็งแขวนลอยหลังผ่านกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. เป็น 9, 22, 91, 368 และ 640 มก./ล. ตามลำดับ เนื่องมาจากการเพิ่มความสูงของชั้นทรายจาก 0.5 ม. จนถึง 2.0 ม. จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการตกผลึกของแคลเซียมฟลูออไรด์ เป็นผลให้เกิดผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์ได้มากกว่า ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ และค่าของแข็งแขวนลอยต่ำที่สุด ซึ่งเหมือนกับการศึกษาของ C. van der Veen และ Graveland (1988) ทั้งนี้การเพิ่มความสูงของชั้นทราย จะต้องดูความเหมาะสมของความสูงของถังปฏิกรณ์กับสภาพพื้นที่ก่อสร้างด้วย

4.2.2 ความเข้มข้นของฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด

ฟลูออไรด์คงเหลือ คือฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยจะมีทั้งที่ละลายอยู่ในน้ำและอยู่ในรูปของผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์ ปริมาณฟลูออไรด์คงเหลือจะแปรตามตัวแปรต่างๆ ดังนี้

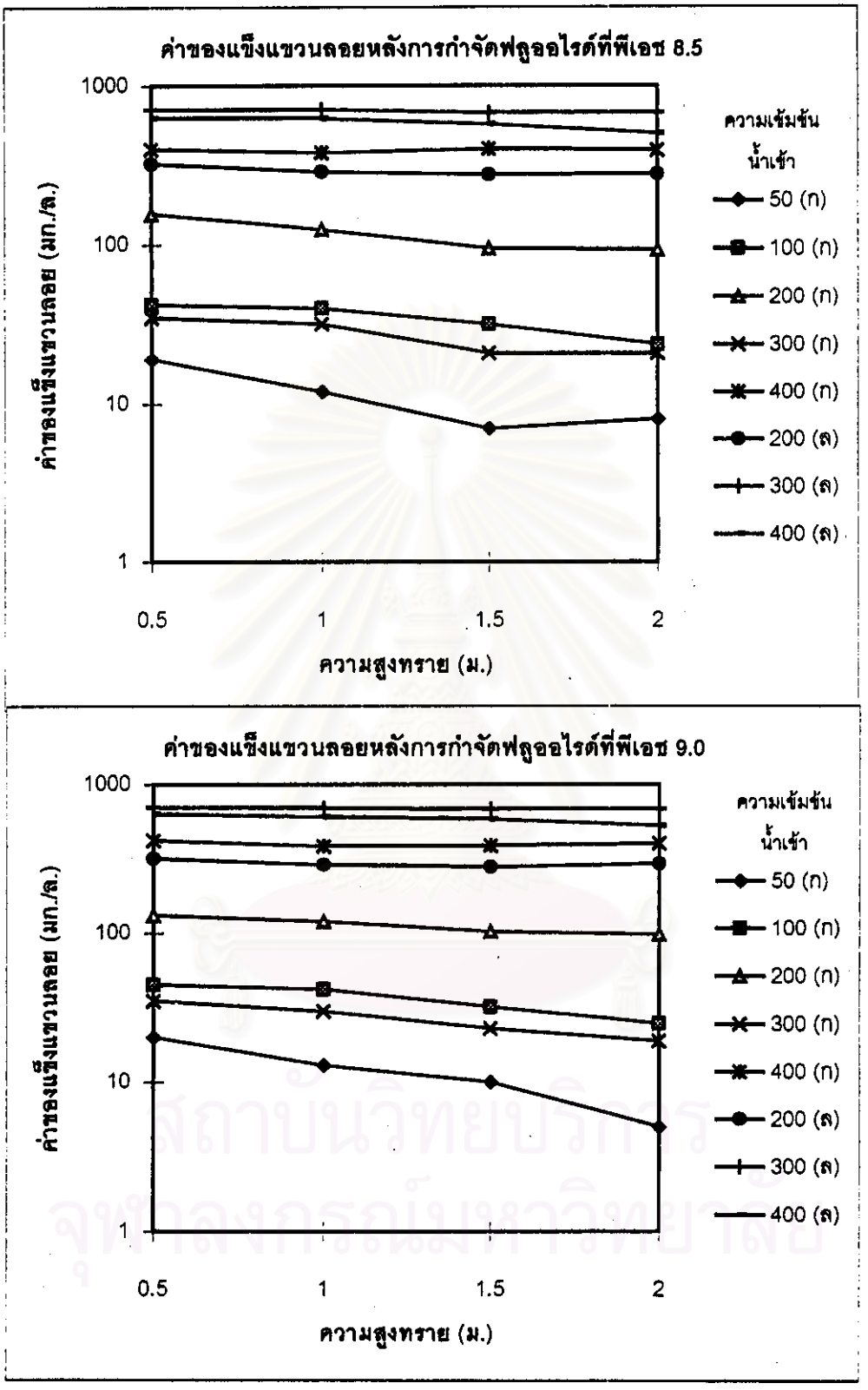


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์กับความสูงทราย ที่สภาวะต่างๆ



หมายเหตุ (ก) = ก่อนกรอง (ล) = หลังกรอง

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับความสูงทราย ที่พีเอช 7.0, 7.5 และ 8.0



หมายเหตุ (ก) = ก่อนกรอง (ล) = หลังกรอง

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับความสูงทราย ที่พีเอช 8.5 และ 9.0

4.2.2.1 ผลของความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า

ตามทฤษฎีแคลเซียมฟลูออไรด์จะสามารถละลายน้ำได้ 8 มก./ล. ฟลูออไรด์ ซึ่งจากการทดลองเมื่อทำการปรับค่าพีเอชในช่วง 7-9 และใช้ความสูงของชั้นทราย 0.5-2.0 ม. จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.1-4.4 และจากรูปที่ 4.12 พบว่าจะได้ค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์คงเหลือต่ำที่สุดที่ค่าพีเอช 7.5 และความสูงของชั้นทราย 2.0 ม. โดยมีค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์คงเหลือหลังจากทำการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. เท่ากับ 13.0, 19.5, 48.1, 174 และ 275 มก./ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วยังมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์เหลืออยู่มากกว่าค่าทางทฤษฎีมาก โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าสูงกว่า 100 มก./ล. ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด Spontaneous nucleation ทำให้มีผลึกของแคลเซียมฟลูออไรด์ปนอยู่ในน้ำออก (Carryover) ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการกรองทราย (Post filtration) เพิ่มเข้ามา เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Wilm และคณะ(1988) เพื่อกำจัดผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์และจะเป็นผลให้ค่าของแข็งแขวนลอยลดลงด้วย

4.2.2.2 ผลของการปรับค่าพีเอชและความสูงของชั้นทราย

ผลของการปรับค่าพีเอชจะเป็นไปในทำนองเดียวกับค่าประสิทธิภาพของการกำจัดฟลูออไรด์ในหัวข้อที่ 4.2.1.2 ดังแสดงในตารางที่ 4.13 - 4.17 คือที่ค่าพีเอช 7.5 และความสูงทราย 2.0 ม. จะมีค่าฟลูออไรด์คงเหลือต่ำสุด พบว่าจะได้ค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์คงเหลือต่ำที่สุดที่ค่าพีเอช 7.5 และความสูงของชั้นทราย 2.0 ม. โดยมีค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์คงเหลือหลังจากทำการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. เท่ากับ 13.0, 19.5, 48.1, 174 และ 275 มก./ล. ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพและค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้น 50 มก./ล

พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการตกผลึก (%)
7.0	0.5	17.1	65.8
7.5	0.5	15.2	69.6
8.0	0.5	16.1	67.8
8.5	0.5	20.2	59.6
9.0	0.5	25.4	49.2
7.0	1.0	14.3	71.4
7.5	1.0	13.9	72.2
8.0	1.0	16.8	66.4
8.5	1.0	18.1	63.8
9.0	1.0	23.9	52.2
7.0	1.5	15.0	70.0
7.5	1.5	13.2	73.6
8.0	1.5	15.5	69.0
8.5	1.5	16.7	66.6
9.0	1.5	23.0	54.0
7.0	2.0	14.4	71.2
7.5	2.0	13.0	74.0
8.0	2.0	13.6	72.8
8.5	2.0	15.5	69.0
9.0	2.0	19.8	60.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพและค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้น 100 มก./ล.

พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการตกผลึก (%)
7.0	0.5	28.2	71.8
7.5	0.5	25.8	74.2
8.0	0.5	27.1	72.9
8.5	0.5	32.4	67.6
9.0	0.5	37.8	62.2
7.0	1.0	25.4	74.6
7.5	1.0	25.0	75.0
8.0	1.0	26.9	73.1
8.5	1.0	31.2	68.8
9.0	1.0	34.8	65.2
7.0	1.5	26.0	74.0
7.5	1.5	23.5	65.5
8.0	1.5	24.9	75.1
8.5	1.5	29.2	70.8
9.0	1.5	32.0	68.0
7.0	2.0	21.2	78.8
7.5	2.0	19.5	80.5
8.0	2.0	21.0	79.0
8.5	2.0	26.6	73.4
9.0	2.0	29.2	70.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพและค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้น 200 มก./ล.

พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการตกผลึก (%)
7.0	0.5	62.4	68.8
7.5	0.5	60.1	70.0
8.0	0.5	63.5	68.3
8.5	0.5	73.8	63.1
9.0	0.5	78.0	61.0
7.0	1.0	53.1	73.5
7.5	1.0	50.0	75.0
8.0	1.0	54.4	72.8
8.5	1.0	60.8	69.6
9.0	1.0	72.2	63.9
7.0	1.5	50.8	79.6
7.5	1.5	48.9	75.6
8.0	1.5	50.0	75.0
8.5	1.5	58.3	70.9
9.0	1.5	70.1	65.0
7.0	2.0	50.2	74.9
7.5	2.0	48.1	76.0
8.0	2.0	48.0	76.0
8.5	2.0	54.5	72.8
9.0	2.0	59.8	70.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพและค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้น 300 มก./ล.

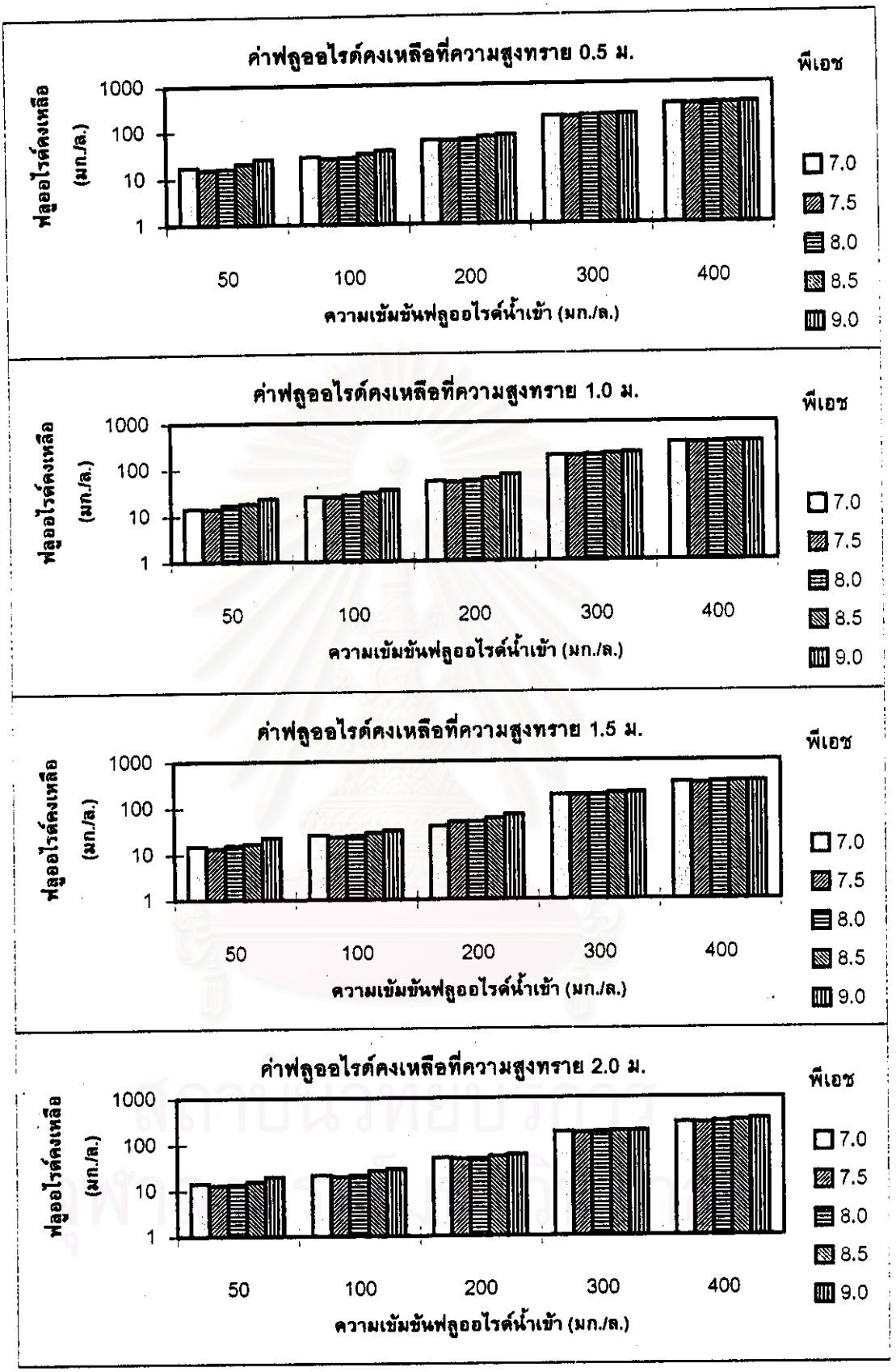
พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการตกผลึก (%)
7.0	0.5	198	34.0
7.5	0.5	189	37.0
8.0	0.5	201	33.0
8.5	0.5	207	31.0
9.0	0.5	213	29.0
7.0	1.0	187	37.7
7.5	1.0	184	38.7
8.0	1.0	190	36.7
8.5	1.0	204	32.0
9.0	1.0	214	28.7
7.0	1.5	185	38.3
7.5	1.5	182	39.3
8.0	1.5	183	39.0
8.5	1.5	197	34.3
9.0	1.5	204	32.0
7.0	2.0	182	39.3
7.5	2.0	174	42.0
8.0	2.0	180	40.0
8.5	2.0	185	38.3
9.0	2.0	189	37.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพและค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้น 400 มก./ล.

พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือก่อนการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการตกผลึก (%)
7.0	0.5	350	12.5
7.5	0.5	338	15.5
8.0	0.5	360	10.0
8.5	0.5	362	9.5
9.0	0.5	368	8.0
7.0	1.0	350	12.5
7.5	1.0	340	15.0
8.0	1.0	352	12.0
8.5	1.0	360	10.0
9.0	1.0	363	9.3
7.0	1.5	332	17.0
7.5	1.5	320	20.0
8.0	1.5	340	15.0
8.5	1.5	350	12.5
9.0	1.5	355	11.3
7.0	2.0	286	28.5
7.5	2.0	275	31.3
8.0	2.0	300	25.0
8.5	2.0	320	20.0
9.0	2.0	340	15.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับความเข้มข้นฟลูออไรด์น้ำเข้า ที่สภาวะต่าง ๆ

4.2.3 กระบวนการกรองตามหลัง (Post filtration)

หลังจากกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด พบว่ายังคงมีความเข้มข้นฟลูออไรด์เหลืออยู่มากกว่า 8 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าการละลายของแคลเซียมฟลูออไรด์ตามทฤษฎี ดังรูปที่ 4.12 และค่าของแข็งแขวนลอยก็ยังมีค่าสูงอยู่ดังรูปที่ 4.10-4.11 จึงควรมีกระบวนการกรองตามหลังกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด เช่นเดียวกับการทดลองของ Wilms และคณะ (1988) ผลจากการทดลองเพิ่มกระบวนการกรองในระบบเป็นดังนี้

4.2.3.1 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ

เนื่องจากการใช้กระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด หากต้องการได้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ที่ดี ต้องอาศัยกลไกการเติบโตของผลึกเป็นกลไกเด่น ซึ่งกลไกดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายมีความอิ่มตัวยิ่งยวดไม่สูงเกินไป ดังนั้นในกรณีที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้าสูง จะเกิดกลไกการเกิดนิวคลีเอชันเป็นกลไกเด่นแทน ทำให้เกิดผลึกขนาดเล็กในน้ำ ไม่เกาะตัวบนเม็ดทราย จึงมีค่าฟลูออไรด์คงเหลือและค่าของแข็งแขวนลอยมาก ควรใช้กระบวนการกรองมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ

ถังกรองที่ใช้เป็นถังกรองชนิดกรองเร็ว ความเร็วในการกรองเท่ากับ 5 ม./ชม. ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.18 - 4.22 และจากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าค่าฟลูออไรด์จะลดลงเมื่อผ่านการกรอง จากการทดลองพบว่า ที่ค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. ค่าพีเอช 7.5 และความสูงของชั้นทราย 2.0 เมตร มีฟลูออไรด์คงเหลือเท่ากับ 11.2, 9.0, 12.5, 130 และ 230 มก./ล. ตามลำดับ นั่นคือช่วงความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าที่ 50-200 มก./ล. สามารถใช้กระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดตามด้วยกระบวนการกรองได้ ส่วนความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าที่มากกว่า 300 มก./ล. ควรทำการเจือจางน้ำเข้าเสียก่อน โดยสามารถใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมาเจือจางได้

ตารางที่ 4.18 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้น 50 มก./ล.

พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการกรอง (%)	ประสิทธิภาพรวมของระบบ (%)
7.0	0.5	13.2	22.8	73.6
7.5	0.5	12.5	17.8	75.0
8.0	0.5	14.5	9.9	71.0
8.5	0.5	14.3	29.2	71.4
9.0	0.5	15.4	39.4	69.2
7.0	1.0	11.3	21.0	77.4
7.5	1.0	11.5	17.3	77.0
8.0	1.0	12.8	23.8	74.4
8.5	1.0	12.5	30.9	75.0
9.0	1.0	15.0	37.2	70.0
7.0	1.5	10.9	27.3	78.2
7.5	1.5	12.0	9.1	76.0
8.0	1.5	14.5	6.5	71.0
8.5	1.5	13.5	19.2	73.0
9.0	1.5	14.2	38.3	71.6
7.0	2.0	11.2	22.2	77.6
7.5	2.0	11.2	13.8	77.6
8.0	2.0	12.8	5.9	74.4
8.5	2.0	13.0	16.1	74.0
9.0	2.0	13.5	31.8	73.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.19 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้น 100 มก./ล.

พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการกรอง (%)	ประสิทธิภาพรวมของระบบ (%)
7.0	0.5	11.5	59.2	88.5
7.5	0.5	11.3	56.2	88.7
8.0	0.5	13.5	50.2	86.5
8.5	0.5	12.8	60.5	87.2
9.0	0.5	14.8	59.3	84.6
7.0	1.0	10.8	57.5	89.2
7.5	1.0	10.5	58.0	89.5
8.0	1.0	12.0	55.4	88.0
8.5	1.0	12.9	58.7	87.1
9.0	1.0	14.8	57.5	85.2
7.0	1.5	11.4	56.2	88.6
7.5	1.5	11.0	53.2	89.0
8.0	1.5	13.5	45.8	86.5
8.5	1.5	12.5	57.2	87.5
9.0	1.5	14.9	53.4	85.1
7.0	2.0	9.8	53.8	90.2
7.5	2.0	9.0	53.8	91.0
8.0	2.0	9.5	54.8	90.5
8.5	2.0	12.0	54.9	88.0
9.0	2.0	12.4	57.5	87.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้น 200 มก./ล.

พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการกรอง (%)	ประสิทธิภาพรวมของระบบ (%)
7.0	0.5	13.0	79.2	93.5
7.5	0.5	12.5	79.2	93.8
8.0	0.5	13.2	79.2	93.4
8.5	0.5	14.5	80.4	92.8
9.0	0.5	15.6	80.0	92.2
7.0	1.0	12.3	76.8	93.9
7.5	1.0	12.0	76.0	94.0
8.0	1.0	12.5	77.0	93.8
8.5	1.0	14.2	76.6	92.9
9.0	1.0	15.5	78.5	92.3
7.0	1.5	13.1	67.9	93.5
7.5	1.5	12.7	74.0	93.7
8.0	1.5	13.2	73.6	93.4
8.5	1.5	13.0	77.7	93.5
9.0	1.5	15.8	77.5	92.1
7.0	2.0	12.9	74.3	93.6
7.5	2.0	12.5	74.0	93.8
8.0	2.0	12.3	74.4	93.9
8.5	2.0	12.8	76.5	93.6
9.0	2.0	14.0	76.6	93.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.21 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้น 300 มก./ล.

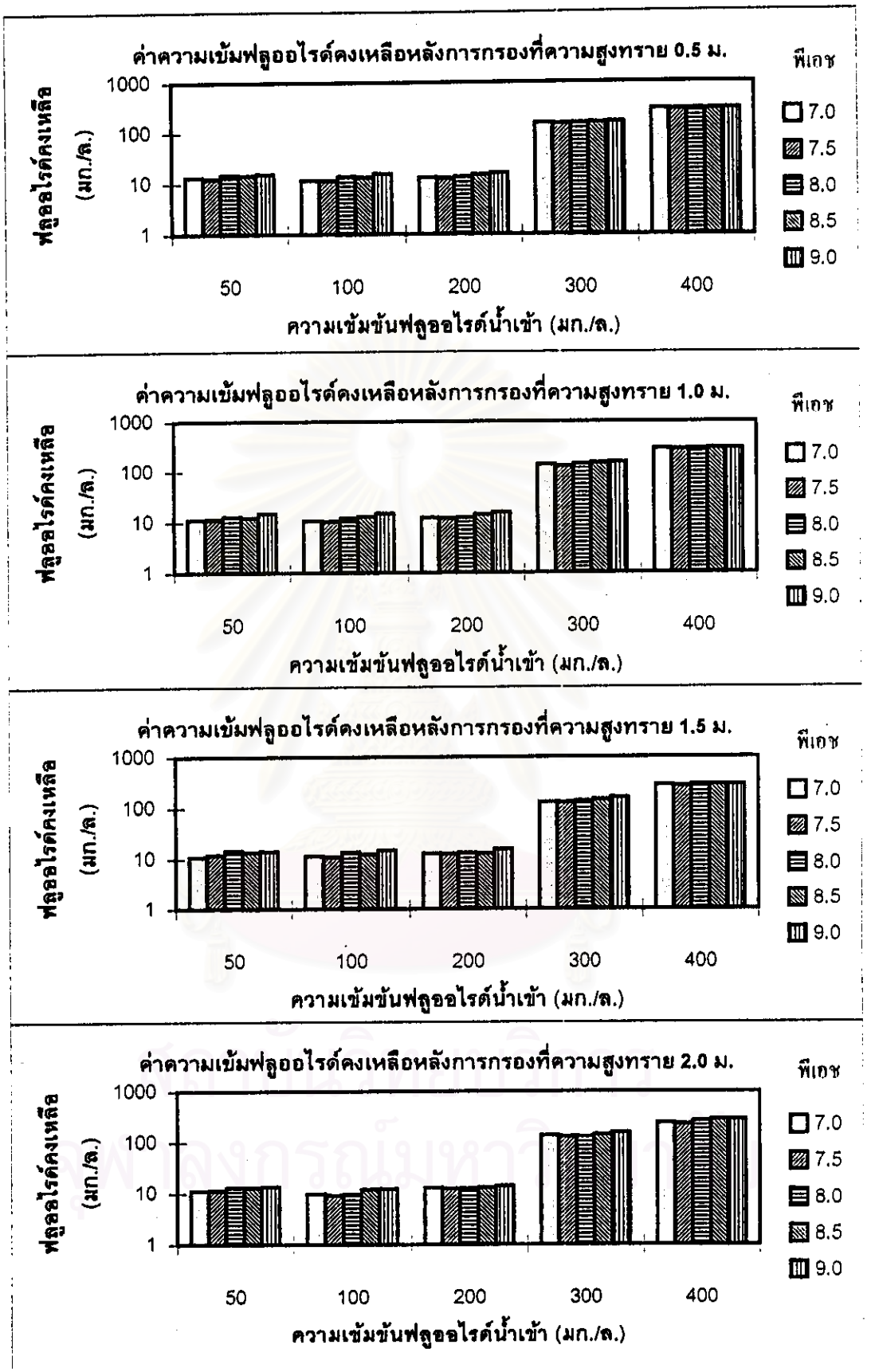
พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการกรอง (%)	ประสิทธิภาพรวมของระบบ (%)
7.0	0.5	153	22.7	49.0
7.5	0.5	148	21.7	50.7
8.0	0.5	154	23.4	48.7
8.5	0.5	155	25.1	48.3
9.0	0.5	160	24.9	46.7
7.0	1.0	140	25.1	53.3
7.5	1.0	130	29.3	56.7
8.0	1.0	142	25.3	52.7
8.5	1.0	148	27.5	50.7
9.0	1.0	155	27.6	48.3
7.0	1.5	130	29.7	56.7
7.5	1.5	128	29.7	57.3
8.0	1.5	135	26.2	55.0
8.5	1.5	145	26.4	51.7
9.0	1.5	160	21.6	46.7
7.0	2.0	135	25.8	55.0
7.5	2.0	130	25.3	56.7
8.0	2.0	130	27.8	56.7
8.5	2.0	142	23.2	52.7
9.0	2.0	155	18.0	48.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.22 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้น 400 มก./ล.

พีเอช	ความสูงชั้นทราย (เมตร)	ฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านการกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพของการกรอง (%)	ประสิทธิภาพรวมของระบบ (%)
7.0	0.5	285	18.6	28.8
7.5	0.5	280	17.2	30.0
8.0	0.5	285	20.8	28.8
8.5	0.5	290	19.9	27.5
9.0	0.5	295	19.8	26.3
7.0	1.0	291	16.9	27.3
7.5	1.0	280	17.6	30.0
8.0	1.0	280	20.5	30.0
8.5	1.0	295	18.1	26.3
9.0	1.0	295	18.7	26.3
7.0	1.5	279	16.0	30.3
7.5	1.5	270	15.6	32.5
8.0	1.5	288	15.3	28.0
8.5	1.5	290	17.1	27.5
9.0	1.5	290	18.3	27.5
7.0	2.0	240	16.1	40.0
7.5	2.0	230	16.4	42.5
8.0	2.0	260	13.3	35.0
8.5	2.0	280	12.5	30.0
9.0	2.0	280	17.6	30.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



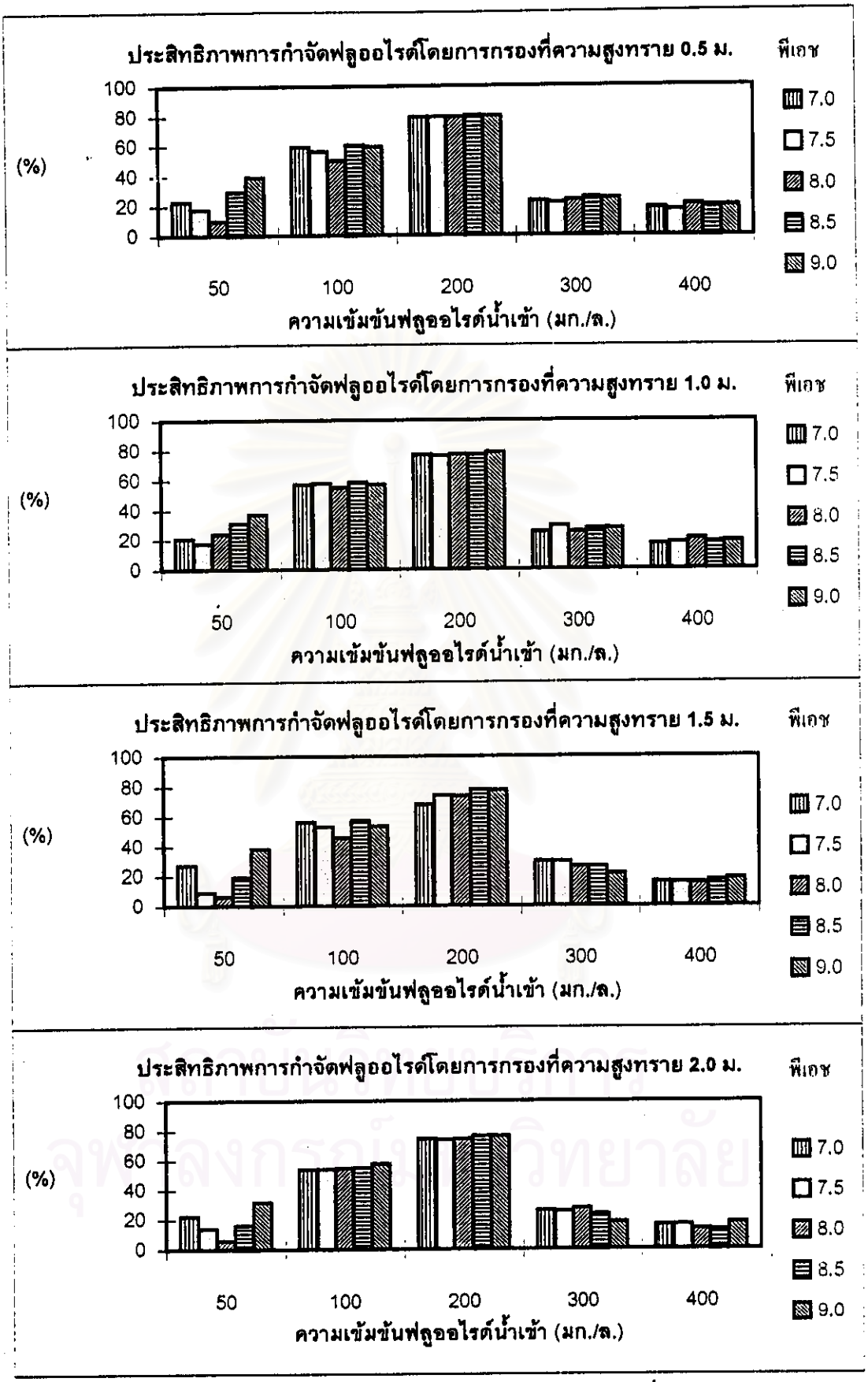
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าฟลูออไรด์คงเหลือหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดตามด้วยการกรองกับความเข้มข้นน้ำเข้า ที่สภาวะต่างๆ

4.2.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของเครื่องกรองทราย

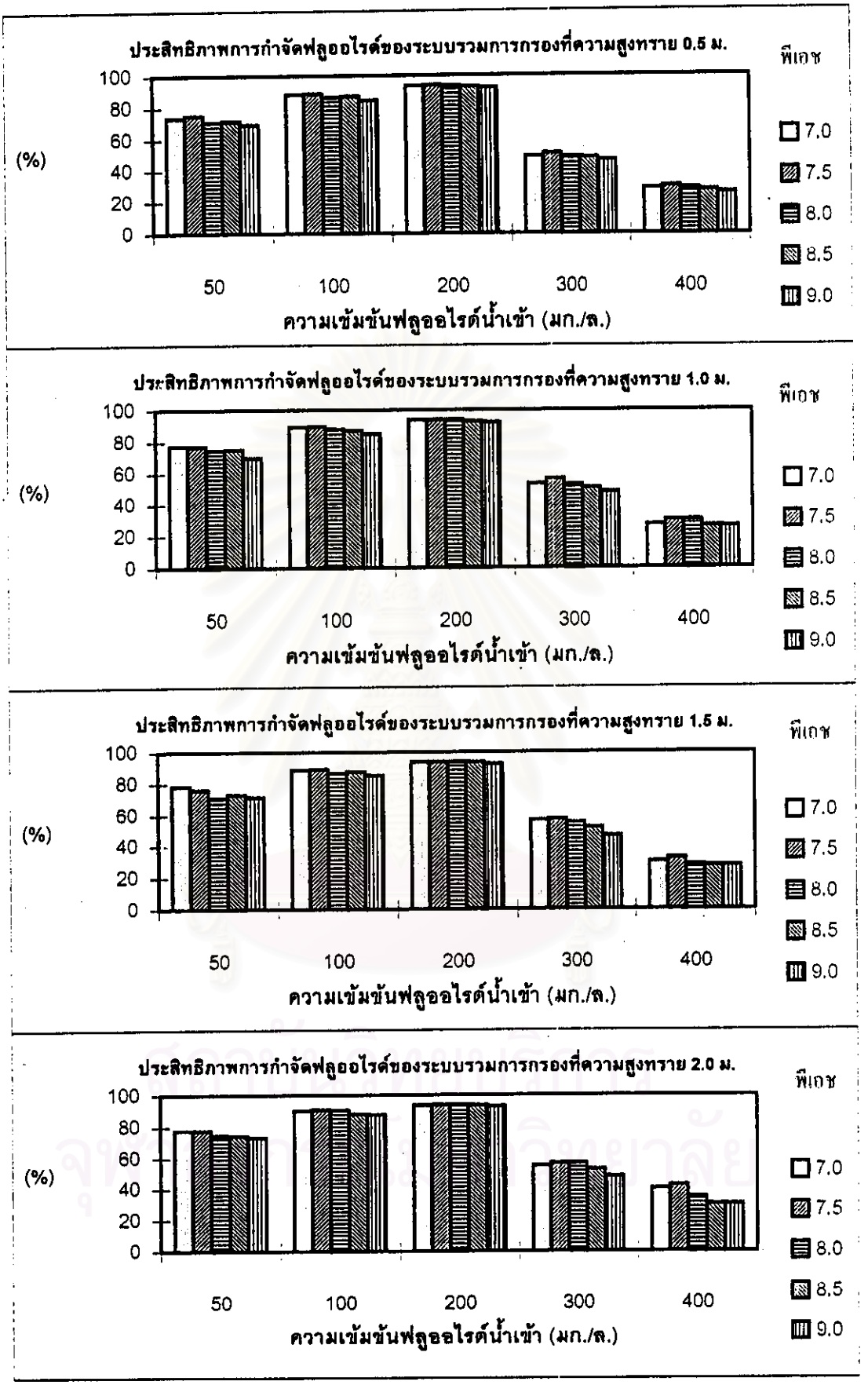
เมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการฟลูอิดไดซ์มากรองต่อด้วยถังกรองทรายแบบกรองเร็ว จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.18 - 4.22 และรูปที่ 4.14 การทดลองที่พีเอช 7.5 ความสูงชั้นทราย 2 เมตร พบว่าประสิทธิภาพของการกรองที่ความเข้มข้น 50,100, 200, 300 และ 400 มก./ล. เป็นร้อยละ 5.4, 52.6, 75, 25.3 และ 16.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 50 และ 100 มก./ล. มีค่าประสิทธิภาพการกรองต่ำ เนื่องจากความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำก่อนเข้าถังกรองทรายนั้นมีค่าต่ำอยู่แล้ว กล่าวคือที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50 และ 100 มก./ล. มีความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่ผ่านกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดก่อนเข้าถังกรองเท่ากับ 13.0 และ 19.5 มก./ล.ซึ่งในกรณีนี้อาจไม่จำเป็นต้องมีถังกรองตามหลังก็ได้ สำหรับที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 300 และ 400 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกรองต่ำ เนื่องจากการเกิด Spontaneous nucleation ทำให้เกิดผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์จำนวนมากในน้ำและผลึกดังกล่าวมีขนาดเล็กจนเครื่องกรองไม่สามารถดักไว้ได้ ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องกรองต่ำ

เมื่อใช้กระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดควบคู่กับกระบวนการกรอง จะทำให้ประสิทธิภาพรวมมีค่าสูง ดังแสดงในตารางที่ 4.18 - 4.22 และรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. ที่พีเอช 7.5 และความสูงชั้นทราย 2.0 ม. มีประสิทธิภาพรวมการกรองเท่ากับร้อยละ 77.6, 91.0, 93.8, 56.7 และ 42.5 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการใช้กระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดควบคู่ไปกับกระบวนการกรองเหมาะสมที่จะใช้กำจัดฟลูออไรด์ในช่วงความเข้มข้น 100-200 มก./ล. ที่พีเอช 7.5 และความสูงของชั้นทราย 2.0 ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของถังกรองที่ตามหลังกระบวนการตกผลึกฟลูออิดไดซ์เบดกับความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า ที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดตามด้วยการกรองกับความเข้มข้นฟลูออไรด์น้ำเข้า ที่สภาวะต่างๆ

4.2.3.3 ค่าของแข็งแขวนลอย

น้ำที่ผ่านการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดเพียงอย่างเดียว จะมีของแข็งแขวนลอยออกสูง ดังในตารางที่ 4.5 - 4.8 และรูปที่ 4.3 แต่เมื่อนำน้ำที่ผ่านถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดมาผ่านถังกรองทราย พบว่าค่าของแข็งแขวนลอยจะลดลง โดยที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50 และ 100 มก./ล. เมื่อผ่านการกรองทรายแล้ว จะมีค่าของแข็งแขวนลอยต่ำกว่า 5 มก./ล. และที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 200, 300 และ 400 มก./ล ที่พีเอช 7.5 และความสูงของชั้นทราย 2.0 ม. จะมีค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 18, 295 และ 480 มก./ล. นั่นคือที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 300 และ 400 มก./ล. เครื่องกรองจะไม่สามารถดักจับของแข็งแขวนลอยออกได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 300 และ 400 มก./ล.

4.3 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

ค่าใช้จ่ายหลักในการดำเนินงานกำจัดฟลูออไรด์ในกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด ประกอบด้วย ค่าสารเคมี และค่าพลังงานไฟฟ้า จากภาคผนวก ค. กรณีที่โรงงานแห่งหนึ่งมีปริมาณน้ำเสียฟลูออไรด์เข้มข้น 800 มก./ล. ปริมาณน้ำเสีย 32 ลบ.ม./วัน คิดเวลาในการกำจัด 8 ชม. ค่าใช้จ่ายการบำบัดต่อปริมาณน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ประมาณ 208 บาท โดยมีรายละเอียดดังนี้

ค่าแคลเซียมคลอไรด์	201.00	บาท
ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์	6.30	บาท
ค่าไฟฟ้าเครื่องสูบน้ำ	0.70	บาท
รวม	208.00	บาท

จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะอยู่ที่ค่าแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นสารเคมีเพื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมที่จะไปจับฟลูออไรด์ในน้ำเสีย สาเหตุที่เลือกใช้แคลเซียมคลอไรด์เนื่องจากแคลเซียมคลอไรด์สามารถละลายน้ำได้ดีและสามารถหาปริมาณแคลเซียมที่ละลายน้ำได้แน่นอน ทำให้สามารถควบคุมปริมาณแคลเซียมต่อฟลูออไรด์ได้คงที่ ทั้งนี้ในการทำงานจริงอาจเลือกใช้สารเคมีชนิดอื่นที่มีราคาต่ำกว่า เช่น ปูนขาว เป็นต้น ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายข้างต้นจะไม่ได้รวมค่าก่อสร้างและค่าแรงงานผู้ควบคุมระบบ

การนำเอากระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด จึงสามารถนำมาใช้กำจัดฟลูออไรด์ในน้ำเสียได้ และควรมีกระบวนการกรองตามหลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ จากขอบเขตในการทดลองครั้งนี้พบว่า สภาวะที่เหมาะจะนำมาใช้กำจัดฟลูออไรด์คือที่ความเข้มข้นน้ำเข้า 50 - 200 มก./ล. พีเอช 7 - 8 และความสูงทรายขณะหยุดนิ่ง 2.0 ม. สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงกว่านี้ควรทำการเจือจางโดยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วก่อน ทั้งนี้ที่สภาวะอื่นๆอาจได้ประสิทธิภาพดีเช่นกัน ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าจะทำการศึกษาต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย