

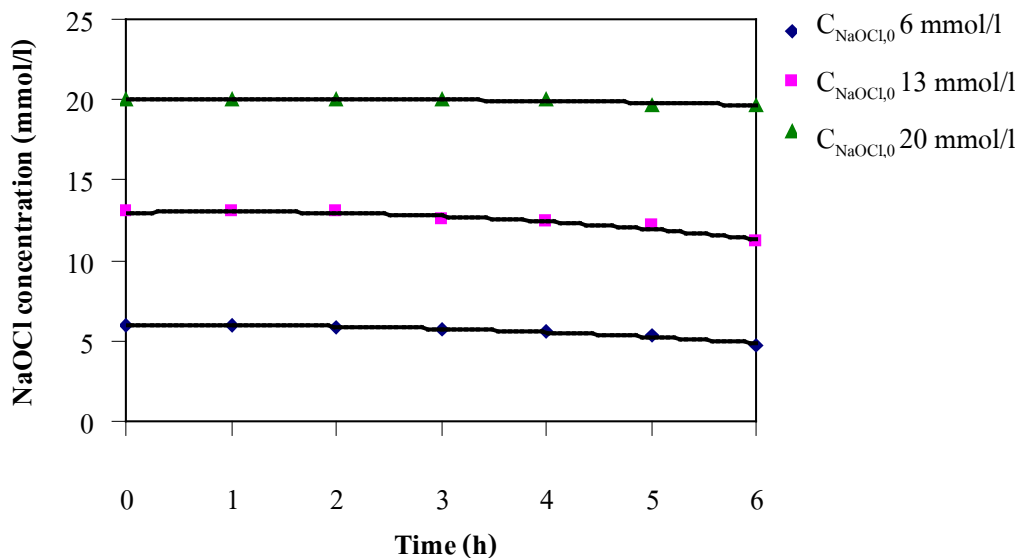
### บทที่ 3

#### ผลและวิจารณ์

1. ผลของตัวแปรดำเนินการ ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินโดยใช้ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน

1.1 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ในสารดูดซึม ( $C_{NaOCl}$ )

การเปลี่ยนแปลงของ  $C_{NaOCl}$  ที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการบำบัดโทลูอิน แสดงดังภาพประกอบที่ 14



ภาพประกอบที่ 14 แสดงผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ  $C_{NaOCl}$  กับเวลา ( $Q_G = 175$  m<sup>3</sup>/h,

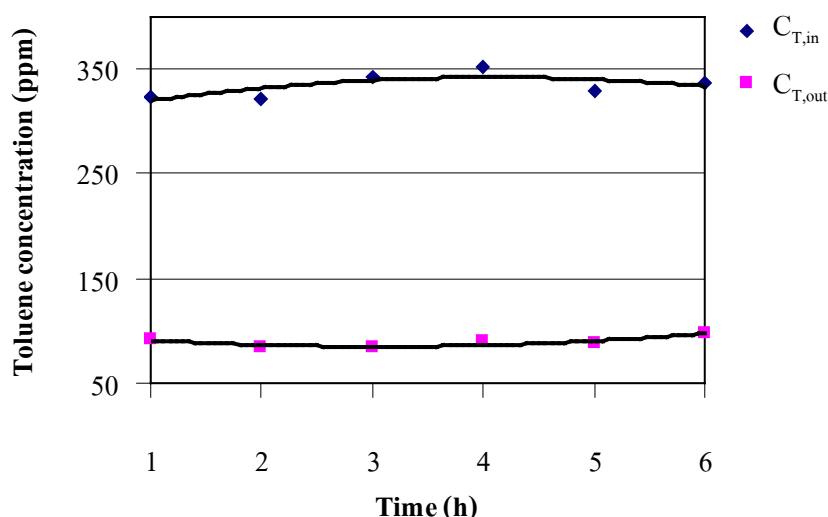
$$C_T = 350 \text{ ppm}, Q_L = 0.65 \text{ m}^3/\text{h}, r_d = 1 \text{ mm})$$

จากภาพประกอบที่ 14 พบว่าที่สภาวะดังกล่าวเมื่อเวลาในการบำบัดผ่านไป  $C_{NaOCl}$  มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับโทลูอิน โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ( $C_{NaOCl,0}$ ) เท่ากับ 6, 13 และ 20 mmol/l จะลดลงเหลือประมาณ 4, 11 และ 19 mmol/l ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ซึ่งจ ะ เห็นได้

ว่า แนวโน้มการลดลงของ  $C_{\text{NaOCl}}$  ระหว่างการทดลองมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 20 mmol/l แนวโน้มของความเข้มข้นในระหว่างการทำบำบัดประมาณได้ว่าคงที่ เนื่องจาก  $C_{\text{NaOCl}}$  ที่ใช้มีค่ามากเกินไป ดังนั้นในระหว่างทำการทดลองจึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับ  $C_{\text{NaOCl}}$  ให้มีค่าคงที่ สำหรับ  $C_{\text{NaOCl}}$  ในระหว่างการทำบำบัดที่สภาวะอื่นๆ มีแนวโน้ม การลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาคผนวก จ จึงสามารถกล่าวได้ว่า  $C_{\text{NaOCl}}$  มีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาในการบำบัด

## 1.2 ความเข้มข้นของโทลูอีนทางเข้า ( $C_{\text{T,in}}$ ) และความเข้มข้นของโทลูอีนทางออก( $C_{\text{T,out}}$ ) ของ wet scrubber และประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีน

การตรวจสอบ  $C_{\text{T,in}}$  และ  $C_{\text{T,out}}$  ของ wet scrubber ในระหว่างการทำบำบัดโทลูอีน พบว่า  $C_{\text{T,in}}$  และ  $C_{\text{T,out}}$  ของ wet scrubber มีค่าค่อนข้างคงตัวตลอดระยะเวลาในการบำบัด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 15 ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีนจาก ความเข้มข้นเฉลี่ยของโทลูอีนที่ทางเข้า ( $C_{\text{in,avg}}$ ) และความเข้มข้นเฉลี่ยของโทลูอีนที่ทางออก ( $C_{\text{out,avg}}$ ) ของ wet scrubber ตลอดเวลาในการบำบัดได้ตามสมการที่ 11



ภาพประกอบที่ 15 แสดง  $C_{\text{T,in}}$  และ  $C_{\text{T,out}}$  ของ wet scrubber ( $Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $C_T = 350 \text{ ppm}$ ,

$$Q_L = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}, C_{\text{NaOCl}} = 13 \text{ mmol/l}, r_d = 0.5 \text{ mm})$$

$$\text{removal efficiency (\%)} = \frac{C_{in,avg} - C_{out,avg}}{C_{in,avg}} \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ  $C_{in,avg}$  = ความเข้มข้นเฉลี่ยของโทลูอินที่เข้าสู่ wet scrubber  
 $C_{out,avg}$  = ความเข้มข้นเฉลี่ยของโทลูอินที่ออกจาก wet scrubber

จากสมการที่ 11 สามารถคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินที่สภาวะดำเนินการตามภาพประกอบที่ 15 ได้เท่ากับร้อยละ 73.25 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอิน ที่สภาวะดำเนินการอื่นๆ แสดงในตารางที่ 5

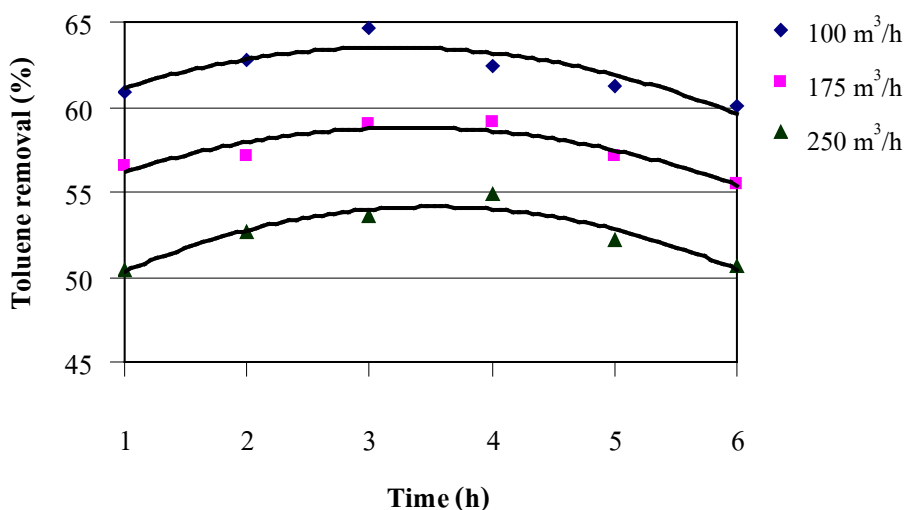
ตารางที่ 5 แสดงผลของสภาวะดำเนินการต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอิน

operating conditions				removal
$Q_G$ ( $m^3/h$ )	$C_T$ (ppm)	$Q_L$ ( $m^3/h$ )	$C_{NaOCl}$ (mmol/l)	efficiency (%)
100	350	0.65	13	62.02
250	350	0.65	13	52.22
175	150	0.65	13	56.69
175	550	0.65	13	57.62
100	550	0.65	20	62.38
250	550	0.65	20	49.52
175	350	0.65	20	62.68
100	150	0.65	20	56.98
100	150	0.65	6	50.34
250	350	0.65	6	44.66
100	550	0.65	6	53.03
250	550	0.65	6	45.47
175	350	0.65	6	49.32
250	150	0.65	20	49.31
175	350	0.65	13	57.06
175	350	0.65	13	56.59
100	150	0.65	13	60.04
175	350	0.5	13	47.05

175	350	0.8	13	73.25
175	750	0.65	13	57.33
175	1,500	0.65	13	60.93

### 1.3 ผลของอัตราการป้อนอากาศเสีย ( $Q_G$ )

ผลการศึกษาผลของ  $Q_G$  ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีนที่เวลาต่างๆ เมื่อควบคุม  $C_T$ ,  $Q_L$  และ  $C_{NaOCl}$  ให้คงที่ แสดงดังภาพประกอบที่ 16



ภาพประกอบที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีนกับเวลา

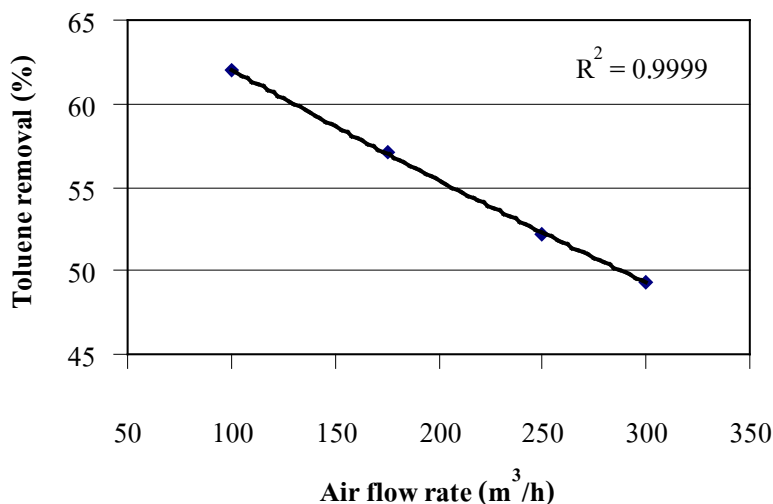
ที่  $Q_G = 100 - 250 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $C_T = 350 \text{ ppm}$ ,  $Q_L = 0.65 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

$C_{NaOCl} = 13 \text{ mmol/l}$ ,  $r_d = 1 \text{ mm}$ )

จากภาพประกอบที่ 16 พบว่าเมื่อ  $Q_G$  ต่างกัน ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีนที่เวลาต่างๆ ระหว่างการทดลองมีแนวโน้มเดียวกัน คือช่วงแรกประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้น จากนั้นจะเริ่มลดลง เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 4 เนื่องจากสารดูดซึมมีความสามารถในการดูดซึม และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอีนได้ปริมาณหนึ่งเท่านั้น โดยเมื่อเวลาผ่านไปความสามารถ ในการดูดซึม และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอีนลดลง ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลง

เมื่อพิจารณาผลของ  $Q_G$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีนโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาบำบัด พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงเมื่อ  $Q_G$  เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 17

ทั้งนี้เนื่องจากที่  $Q_G$  ต่ำ โทลูอีนมีเวลาอยู่ในถังบำบัดนานกว่าที่  $Q_G$  สูง โดยระยะเวลาที่โทลูอีนอยู่ใน wet scrubber คำนวณได้ดังสมการที่ 12



ภาพประกอบที่ 17 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด โทลูอีนที่  $Q_G = 100 - 300 \text{ m}^3/\text{h}$

( $C_T = 350 \text{ ppm}$ ,  $Q_L = 0.65 \text{ mol/l}$ ,  $C_{\text{NaOCl}} = 13 \text{ mmol/l}$ ,  $r_d = 1 \text{ mm}$ )

$$R_t = \frac{V}{Q} \quad (12)$$

เมื่อ  $R_t =$  Retention time (s)

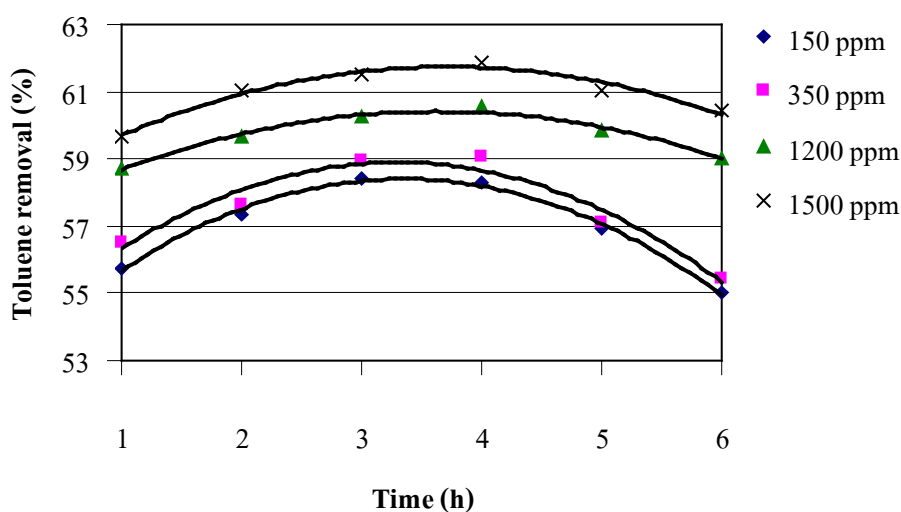
$V =$  Volume of wet scrubber ( $\text{m}^3$ )

$Q =$  Flow rate ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

จากสมการที่ 12 พบว่าที่ปริมาตรของ wet scrubber คงที่ การเพิ่ม  $Q_G$  จะส่งผลให้ระยะเวลาที่โทลูอีนอยู่ใน wet scrubber ลดลง โดยในการทดลองนี้ปริมาตรของ wet scrubber มีค่าคงที่ที่  $0.4 \text{ m}^3$  ทำให้ในช่วงอัตราการไหลของอากาศที่ศึกษา มีระยะเวลาที่โทลูอีนอยู่ใน wet scrubber อยู่ในช่วง 4.8 – 14.4 วินาที นอกจากนั้นที่  $Q_G$  ต่ำจะส่งผลให้ L/G ratio มีค่าสูง ซึ่งมีผลต่อการปะทะ (impaction) และการแพร่ (diffusion) ซึ่งเป็นกลไกเบื้องต้นในระบบบำบัดด้วย wet scrubber โดยทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น (Benthea, 1978) ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมทั้งจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการดูดซับ ที่  $Q_G$  ต่ำ มีค่าสูงกว่า ที่  $Q_G$  สูง อย่างชัดเจน

#### 1.4 ผลของความเข้มข้นของโทลูอีนในอากาศเสีย ( $C_T$ )

ผลของ  $C_T$  ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีนที่เวลาต่างๆ เมื่อ ค ว บ  
ค ว ม  $Q_G, Q_L$  และ  $C_{NaOCl}$  ให้คง ที่ แ ส ด ง ดั ง ภาพประกอบที่ 18



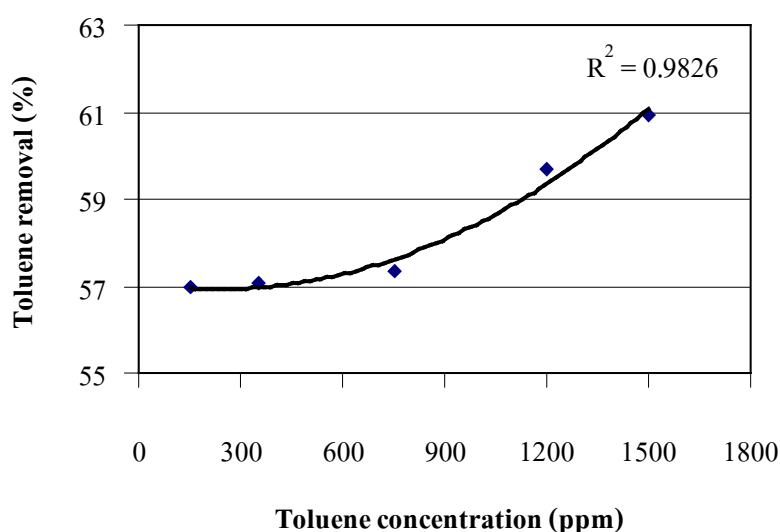
ภาพประกอบที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  
ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีนกับเวลา

$$\begin{aligned} \text{ที่ } C_T = 150 - 1,500 \text{ ppm } (Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}, Q_L = 0.65 \text{ m}^3/\text{h}, \\ C_{NaOCl} = 13 \text{ mmol/l}, r_d = 1 \text{ mm}) \end{aligned}$$

จากภาพประกอบที่ 18 พบว่าที่  $C_T$  ต่างกันประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีน ที่เวลาต่างๆ  
ระหว่างการทดลองมีแนวโน้มเป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือ ประสิทธิภาพ ในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้น  
ในช่วงแรก และเริ่มลดลงเมื่อเวลาในการบำบัดเข้าสู่ช่วงที่ 5 แต่อย่างไรก็ตามที่  $C_T$  อยู่ในช่วงต่ำ (150 –  
350 ppm) การลดลงของประสิทธิภาพการบำบัด กับเวลาจะมากกว่าที่  $C_T$  อยู่ในช่วงสูง (1,200 – 1,500 ppm)  
ทั้งนี้เพราะในช่วง  $C_T$  ต่ำผลของความสามารถในการดูดซึมเข้ามามีบทบาทต่อประสิทธิภาพในการ  
บำบัดมากกว่าผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเมื่อเวลาในการบำบัดผ่านไป ความเข้มข้นของโทลู  
อีนในสารดูดซึมสูงขึ้น จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว และไม่สามารถกักเก็บโทลูอีนไว้ได้อีก ประสิทธิภาพในการ  
บำบัดโทลูอีนกับเวลาจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับช่วง  $C_T$  สูง การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมี  
บทบาทมากกว่า ทั้งนี้เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโทลูอีนกับโซเดียมไฮโปคลอ

ไรท์จะแปรผันโดยตรงกับ  $C_T$  (Thakatkaw, 2004) โดยที่  $C_T$  สูง โทลูอินมีโอกาสละลายในสารดูดซึม และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มาก ซึ่งการใช้โทลูอินในการทำปฏิกิริยานี้จะทำให้ความเข้มข้นของโทลูอินในสารดูดซึมลดลง ดังนั้นสารดูดซึมจึงสามารถที่จะกักเก็บโทลูอินเอาไว้ได้อีก ส่งผลให้ระยะเวลาที่สารดูดซึมจะเกิดการอิ่มตัวนานขึ้น ซึ่งผลร่วมกันระหว่างกลไกการดูดซึม และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้การลดลงของประสิทธิภาพกับเวลาที่  $C_T$  สูงน้อยกว่าที่  $C_T$  ต่ำอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาผลของช่วง  $C_T$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาบำบัด พบว่าเมื่อ  $C_T$  เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 19 ซึ่งสามารถแบ่งแนวโน้มของประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วง  $C_T$  มีค่าต่ำ (150-750 ppm) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 57-58 ซึ่งถือว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอินในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซึมมากกว่าเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และช่วง  $C_T$  มีค่าสูง (750-1,500 ppm) ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 58-61 โดยเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อ  $C_T$  มีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นไปตามกฎอัตราของการเกิดปฏิกิริยาของโทลูอินกับโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ดังสมการที่ 13 (Thakatkaw, 2004)



ภาพประกอบที่ 19 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินที่  $C_T = 150 - 1,500$  ppm

$$(Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}, Q_L = 0.65 \text{ m}^3/\text{h}, C_{\text{NaOCl}} = 13 \text{ mmol/l}, r_d = 1 \text{ mm})$$

$$-r_{\text{toluene}} = kC_T^{1.1}C_{\text{NaOCl}}^{0.1} \quad (13)$$

เมื่อ  $-r_{\text{toluene}}$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยาของโทลูอิน

$k$  = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

$C_T$  = ความเข้มข้นของโทลูอิน

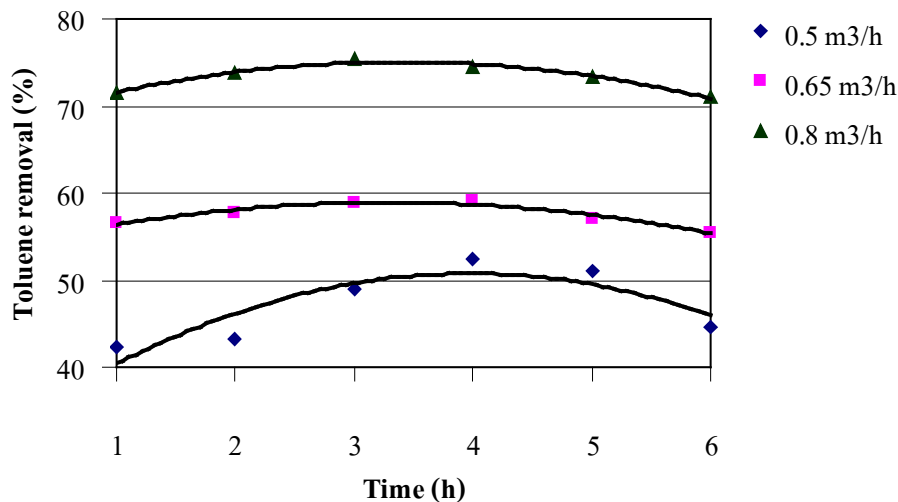
$C_{\text{NaOCl}}$  = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรต์

จากสมการที่ 13 พบว่าอันดับของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโทลูอิน และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ เท่ากับ 1.1 และ 0.1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารทั้ง 2 ชนิด โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะสูงขึ้น เมื่อโทลูอินมีความเข้มข้นสูง (Thakatkaew, 2004) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด มีค่าสูงขึ้นตาม  $C_T$  อย่างเห็นได้ชัด

### 1.5 ผลของอัตราการไหลของสารดูดซึม ( $Q_L$ )

ผลของ  $Q_L$  ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินที่เวลาต่างๆ มีอ ค ว บ ค อ ม  $Q_G, C_T$  และ  $C_{\text{NaOCl}}$  ให้คงที่ แสดงดังภาพประกอบที่ 20





ภาพประกอบที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินกับเวลา

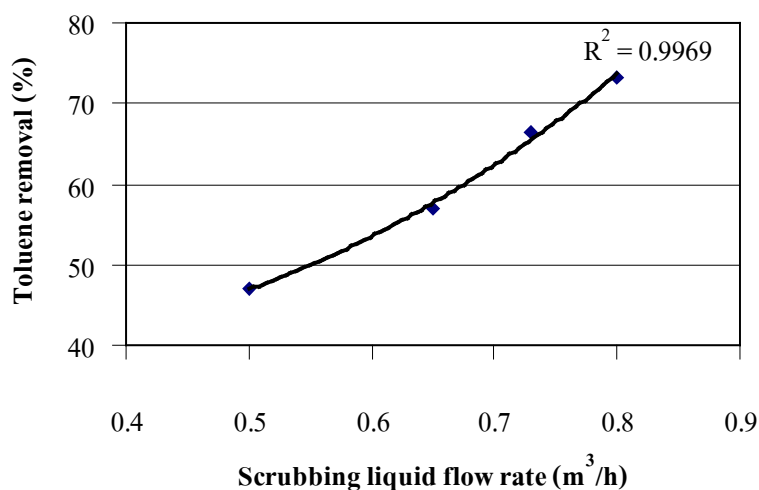
ที่  $Q_L = 0.5 - 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $C_T = 350 \text{ ppm}$ ,

$C_{\text{NaOCl}} = 13 \text{ mmol/l}$ ,  $r_d = 1 \text{ mm}$ )

จากภาพประกอบที่ 20 พบว่าที่  $Q_L$  ต่างๆ ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นกับเวลาที่เพิ่มขึ้น และเริ่มลดลงเมื่อเวลาในการบำบัดเข้าสู่ชั่วโมงที่ 5 โดยที่  $Q_L$  สูง ( $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ) แนวโน้มการลดลงของประสิทธิภาพการบำบัดกับเวลา จะน้อยกว่ากรณีที่  $Q_L$  มีค่าต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากที่  $Q_L$  สูง ปริมาณของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่เข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอินภายใน wet scrubber มีมากกว่า ส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเข้ามา มีบทบาทร่วมกับความสามารถในการดูดซึมมากขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดจึงสูงกว่า และเปลี่ยนแปลงกับเวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่  $Q_L$  ต่ำ

เมื่อพิจารณาผลของ  $Q_L$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาบำบัด พบว่าเมื่อเพิ่ม  $Q_L$  จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินสูงขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 21 โดย  $Q_L$  ที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง  $0.5 - 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$  ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่ม  $Q_L$  จะเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มปริมาณของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่เข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับโทลูอินภายในถังบำบัด จึงสามารถบำบัดโทลูอินได้มากขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่ม  $Q_L$  จะส่งผลให้ L/G ratio เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการดักจับอนุภาคโทลูอินภายใน wet scrubber ด้วยกลไกการปะทะ และการแพร่ โดยจะเพิ่มโอกาสให้อนุภาคของโทลูอินเข้าปะทะ และเกิดการดูดซึมรวมถึงทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารดูดซึมได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chien และ Chu

(2000) ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่ม L/G ratio มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด  $\text{NO}_x$  และ  $\text{SO}_x$  ด้วยระบบ wet scrubber มีค่าสูงขึ้น

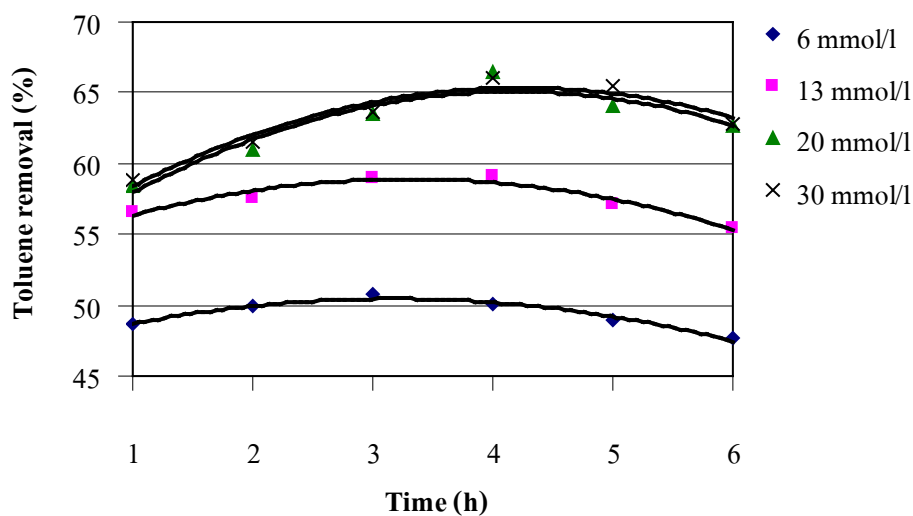


ภาพประกอบที่ 21 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอินที่  $Q_L = 0.5 - 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

$$C_T = 350 \text{ ppm}, C_{\text{NaOCl}} = 13 \text{ mmol/l}, r_d = 1 \text{ mm}$$

### 1.6 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ในสารดูดซึม ( $C_{\text{NaOCl}}$ )

ผลของ  $C_{\text{NaOCl}}$  ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินที่เวลาต่างๆ เมื่อ ค ว บ ค ม  $Q_G$ ,  $C_T$  และ  $Q_L$  ให้คงที่ แสดงดังภาพประกอบที่ 22

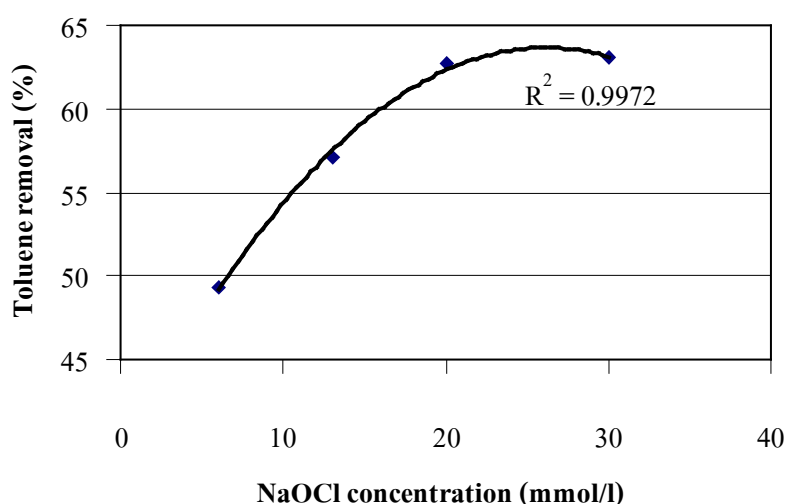


ภาพประกอบที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินกับเวลา

$$\begin{aligned} \text{ที่ } C_{\text{NaOCl}} &= 6 - 30 \text{ mmol/l} \quad (Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}, C_T = 350 \text{ ppm}, \\ Q_L &= 0.65 \text{ m}^3/\text{h}, r_d = 1 \text{ mm}) \end{aligned}$$

จากภาพประกอบที่ 22 พบว่าเมื่อ  $C_{\text{NaOCl}}$  สูง ( $\geq 20 \text{ mmol/l}$ ) ประสิทธิภาพ ในการบำบัดโทลูอินที่เวลาใดๆ มีค่าสูงกว่าที่  $C_{\text{NaOCl}}$  ต่ำ ( $< 20 \text{ mmol/l}$ ) เนื่องจากประสิทธิภาพ ในการบำบัดขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาออกซิเดชันร่วมกับความสามารถในการดูดซึม โดยเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงจุดที่สารดูดซึมอิ่มตัว ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเริ่มมีแนวโน้มลดลง แต่ผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะช่วยดึงไม่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงมากนัก

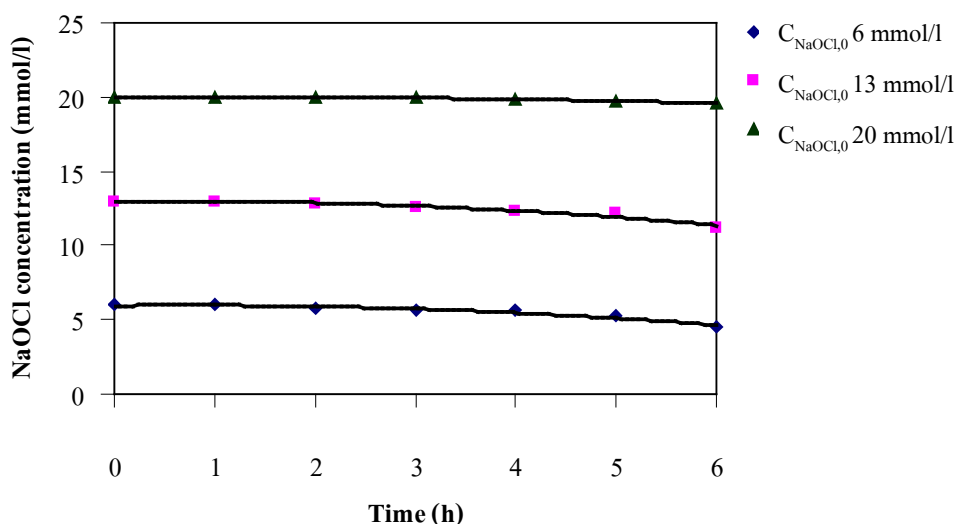
เมื่อพิจารณาผลของ  $C_{\text{NaOCl}}$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาบำบัด พบว่าเมื่อ  $C_{\text{NaOCl}}$  แปรเปลี่ยนในช่วง 6 - 20 mmol/l ประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอินจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 23 ซึ่งเป็นไปตามกฎอัตรา ดังสมการที่ 10 แต่เมื่อ  $C_{\text{NaOCl}}$  เพิ่มสูงเกินกว่า 20 mmol/l ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่สูงกว่า 20 mmol/l ถือเป็นปริมาณที่มากเกินไปสำหรับการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้น  $C_{\text{NaOCl}}$  ที่มีความเหมาะสมในการบำบัดโทลูอินคือไม่เกิน 20 mmol/l



ภาพประกอบที่ 23 แสดง ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินที่  $C_{\text{NaOCl}} = 6 - 30 \text{ mmol/l}$   
 $(Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}, C_T = 350 \text{ ppm}, Q_L = 0.65 \text{ m}^3/\text{h}, r_d = 1 \text{ mm})$

## 2. ผลของขนาดอนุภาคสารดูดซึม ( $r_d$ ) ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โทลูอิน โดยใช้ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน

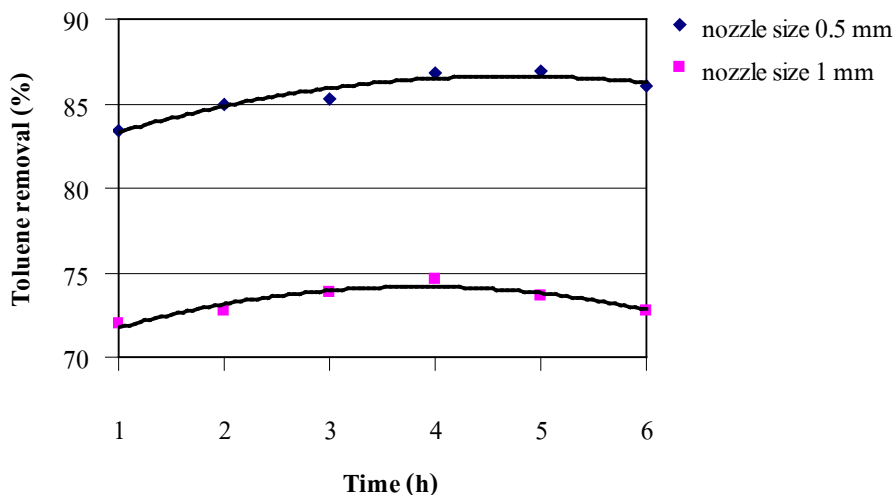
ผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ  $C_{\text{NaOCl}}$  ที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการบำบัดโทลูอินเมื่อลด  $r_d$  พบว่าเมื่อเวลาในการบำบัดผ่านไป  $C_{\text{NaOCl}}$  มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมีการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอิน แต่แนวโน้มการลดลงของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ในทุกค่าความเข้มข้นระหว่างการทำทดลองมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 24 ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า  $C_{\text{NaOCl}}$  มีค่าคงที่ตลอดระยะเวลา ในการบำบัด



ภาพประกอบที่ 24 แสดงผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ  $C_{\text{NaOCl}}$  กับเวลาเมื่อลด  $r_d$

$$(Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}, C_T = 350 \text{ ppm}, Q_L = 0.65 \text{ m}^3/\text{h}, r_d = 0.5 \text{ mm})$$

ในการศึกษาผลของ  $r_d$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอิน จะลดขนาดของ  $r_d$  โดยการใช้หัวพ่นฝอยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูทางออกที่เล็กลงจาก 1 mm (ให้  $r_d = 1 \text{ mm}$ ) เป็น 0.5 mm (ให้  $r_d = 0.5 \text{ mm}$ ) ซึ่งพบว่าผลของ  $r_d$  ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินกับเวลาเมื่อควบคุม  $Q_G$ ,  $C_T$ ,  $Q_L$  และ  $C_{\text{NaOCl}}$  ให้มีค่าคงที่ แสดงดังภาพประกอบที่ 25



ภาพประกอบที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินกับเวลาที่  $r_d = 1$

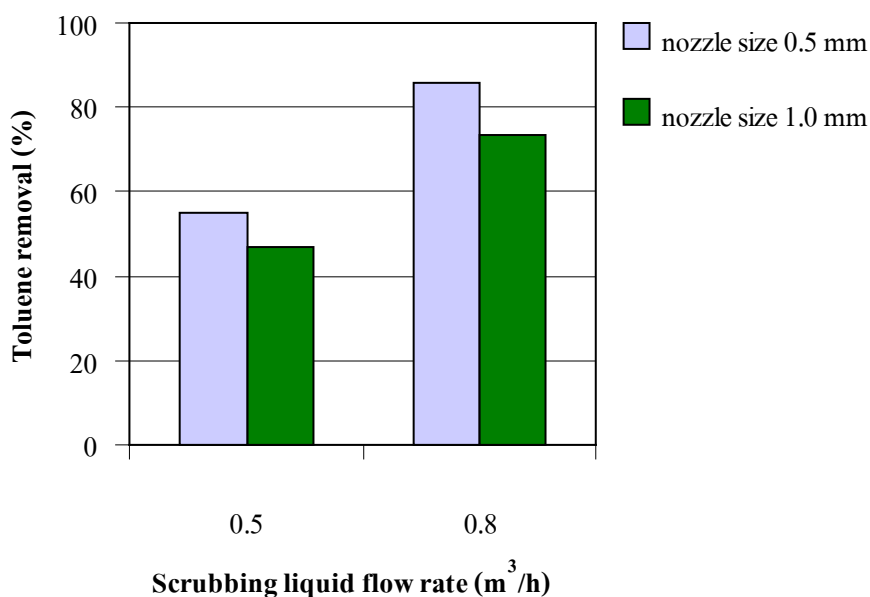
และ 0.5 mm ( $Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $C_T = 350 \text{ ppm}$ ,  $Q_L = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

$$C_{\text{NaOCl}} = 30 \text{ mmol/l}$$

จากภาพประกอบที่ 25 พบว่าเมื่อ  $r_d$  มีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพในการบำบัด จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อถึงชั่วโมงที่ 6 เนื่องจากอนุภาคสารดูดซึมขนาดเล็กจะส่งผลให้พื้นที่ผิวในการดักจับโทลูอินในอากาศเสียมีมากขึ้น และโทลูอินสามารถละลายในสารดูดซึม และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโซเดียมไฮโปคลอไรท์ภายใน wet scrubber และดังผสมได้มากขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดที่เวลาต่างๆ จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าที่  $r_d$  มีขนาดใหญ่

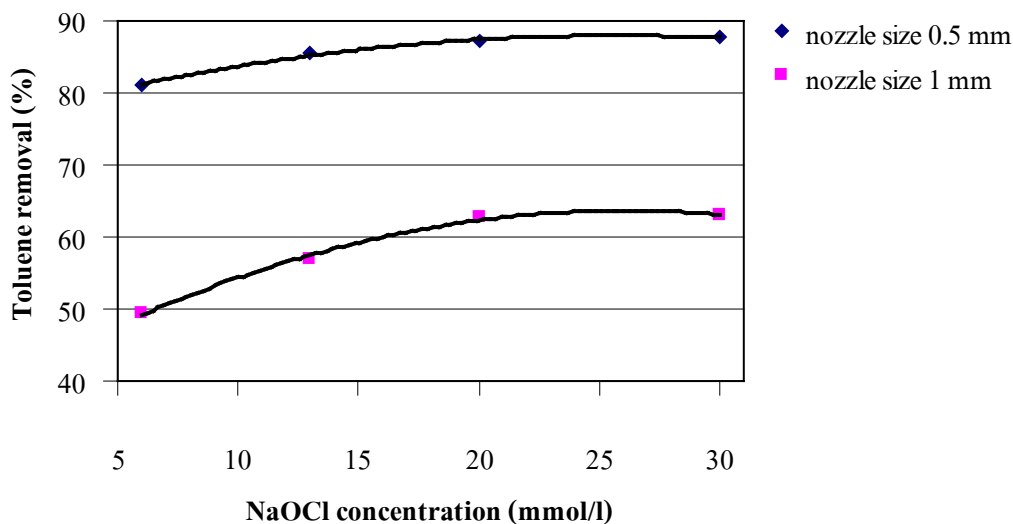
เมื่อพิจารณาผลของ  $r_d$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาบำบัด พบว่าเมื่อควบคุม  $Q_G$ ,  $C_T$  และ  $C_{\text{NaOCl}}$  ให้มีค่าคงที่ ประสิทธิภาพในการบำบัด โทลูอินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $r_d$  มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะเป็นเช่นนี้ในทุกๆ ช่วงของ  $Q_L$  ดังแสดงในภาพประกอบที่ 26 เช่นเดียวกันกับเมื่อควบคุม  $Q_G$ ,  $C_T$  และ  $Q_L$  ให้คงที่ ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ  $r_d$  มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะเป็นเช่นนี้ในทุกๆ ช่วงของ  $C_{\text{NaOCl}}$  ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในภาพประกอบที่ 27 ทั้งนี้เนื่องจาก  $r_d$  ที่เล็กลงส่งผลให้มีพื้นที่ผิว ในการดูดซึม และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอินมากขึ้น รวมถึงเป็นการเพิ่มจำนวนของอนุภาคสารดูดซึมอีกด้วย โดยหากคิดค่า 1 หยดของสารดูดซึมคือปฏิกิริยาเคมีย่อยๆ 1 ปฏิกิริยา เมื่อมีปฏิกิริยาจำนวนมากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจึงมีมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพ ในการบำบัดโทลูอินเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นการลด  $r_d$  ยังส่งผลต่อกลไกการปะทะ และการแพร่ในระบบ

บำบัดด้วย wet scrubber โดยจะเพิ่มโอกาสในการเกิดกลไกทั้งสองของอนุภาคของแข็ง หรือแก๊สในกระแสอากาศกับอนุภาคน้ำดูดซึม ทำให้ประสิทธิภาพดักจับมีมากขึ้น (Benthea, 1978) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Ebert และ Buttner (1996) ซึ่งศึกษาผลของสภาวะดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัดฝุ่นละอองในระบบ wet scrubber โดยพบว่า เมื่อควบคุม L/G ratio ให้คงที่ อนุภาคน้ำดูดซึมขนาดเล็ก จะมีระยะเวลาอยู่ในระบบที่นานขึ้น และสามารถดักจับฝุ่นละอองได้ประสิทธิภาพดีกว่าอนุภาคน้ำดูดซึมขนาดใหญ่



ภาพประกอบที่ 26 แสดงผลของ  $r_d$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินที่  $Q_L = 0.5$  และ  $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$

$$(Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}, C_T = 350 \text{ ppm}, C_{\text{NaOCl}} = 30 \text{ mmol/l})$$



ภาพประกอบที่ 27 แสดง ผลของ  $r_d$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินที่

$$C_{\text{NaOCl}} = 6\text{-}30 \text{ mmol/l} \quad (Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}, \quad C_T = 350 \text{ ppm}, \quad Q_L = 0.8 \text{ m}^3/\text{h})$$

### 3. แบบจำลองอธิบายผลของสภาวะดำเนินการ

จากข้อมูลประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินที่ได้จากการทดลอง สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้โดยใช้โปรแกรม Essential regression ได้แบบจำลองแสดงดังสมการที่ 14 ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการบำบัดโทลูอินได้

$$y = 123.22 + 292.46x_3^2 - 0.08792 x_1 x_5 + 0.002272 x_1 x_4 - 282.51x_3 + 0.00479 x_2 \quad (14)$$

โดยกำหนดให้  $y$  = ประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอิน (ร้อยละ)

$x_1$  = อัตราการไหลของอากาศเสีย ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

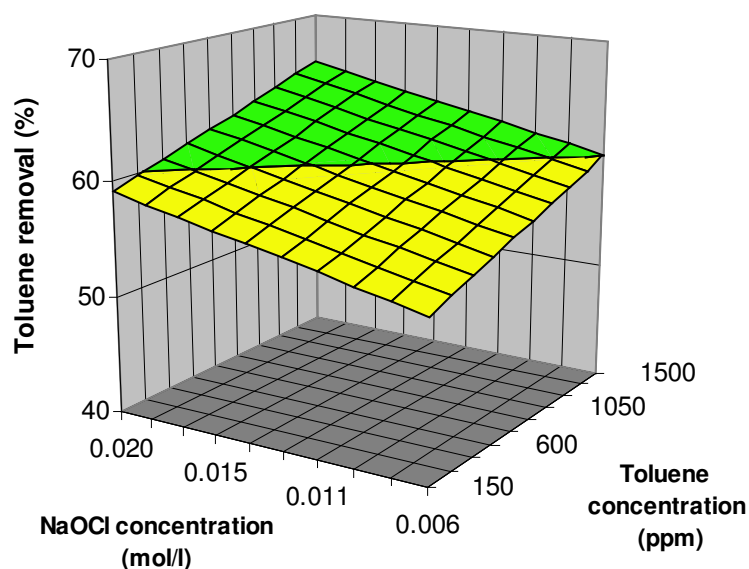
$x_2$  = ความเข้มข้นของโทลูอินในอากาศเสีย (ppm)

$x_3$  = อัตราการไหลของสารดูดซึม ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$x_4$  = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (mmol/l)

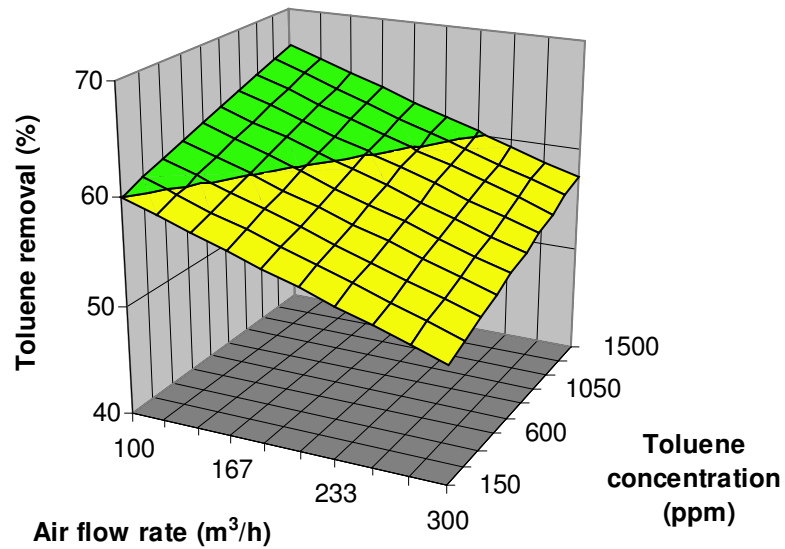
$x_5$  = ขนาดของหัวพ่นฝอย (mm)

จากสมการที่ 11 จะแสดงให้เห็นถึงตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการบำบัดโทลูอิน ซึ่งได้แก่  $Q_G$ ,  $C_T$ ,  $Q_L$ ,  $C_{NaOCl}$  และ  $r_d$  (กำหนด  $r_d$  โดยใช้ขนาดของหัวฟุ้งฝอย ที่ต่างกัน) ซึ่งในการพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้จะพิจารณาจาก P value โดยแต่ละเทอมในแบบจำลองที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญจะให้ P value ที่ต่ำกว่า 0.05 และ P value จะมีค่าต่ำมากๆ เมื่อเทอมนั้นมีผลต่อการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญมากขึ้น ส่วนเทอมที่มี P value สูงกว่า 0.05 จะตัดทิ้ง ซึ่งจากการทดลองเทอมที่มีผลต่อการบำบัดโทลูอินสูง ได้แก่ เทอมของอัตราการไหลของอากาศเสีย และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูทางออกของหัวฟุ้งฝอย ( $P \text{ value} = 2.76 \times 10^{-6}$ ) โดยแบบจำลองที่ได้นี้มีค่า  $R^2$  และ  $R^2_{adj}$  เท่ากับ 0.94 และ 0.92 ตามลำดับ ค่า  $R^2$  จะบอกถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ซึ่งค่า  $R^2$  ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วน ค่า  $R^2_{adj}$  หากมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $R^2$  แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้ล้วนส่งผล อย่างมีนัยสำคัญต่อการบำบัดทั้งสิ้น จากข้อมูลแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของ ตัวแปรดำเนินการต่างๆ กับประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอิน ในรูปของกราฟพื้นผิวได้ ดังภาพประกอบที่ 28 – 31

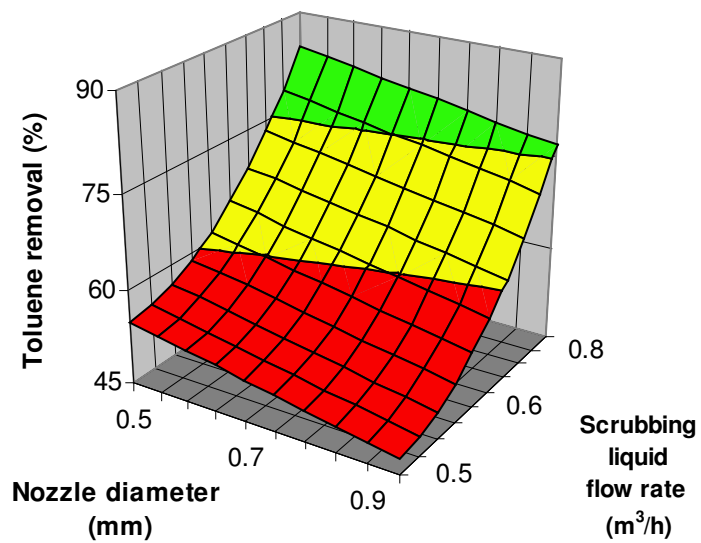


ภาพประกอบที่ 28 แสดงกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_T$  และ  $C_{NaOCl}$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอิน

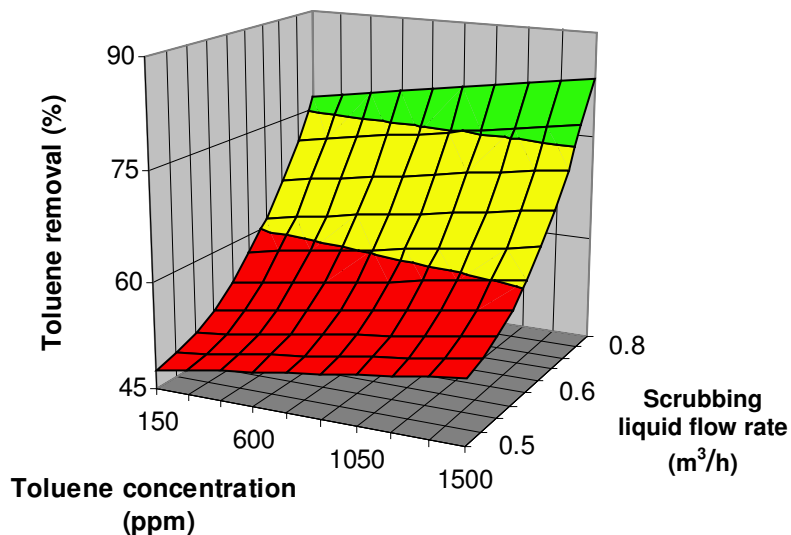




ภาพประกอบที่ 29 แสดงกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q_G$  และ  $C_T$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอิน



ภาพประกอบที่ 30 แสดงกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q_L$  และ ขนาดหัวพ่นฝอยที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอิน



ภาพประกอบที่ 31 แสดงกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_T$  และ  $Q_L$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอิน

ประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอินซึ่งคำนวณจากแบบจำลองในสมการที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอินที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง

run no.	removal efficiency from experimental (%)	removal efficiency from Model (%)
1	62.02	58.99
2	52.22	50.23
3	56.69	53.65
4	57.62	55.57
5	62.38	61.54
6	49.52	55.16

7	62.68	57.39
8	56.98	59.62
9	50.34	56.44
10	44.66	46.25
11	53.03	58.35
12	45.47	47.21
13	49.32	51.82
14	49.31	53.25
15	57.06	54.61
16	56.59	54.61
17	60.04	58.03
18	47.05	46.54
19	73.25	75.84
20	57.33	56.52
21	60.92	60.11

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอีนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง (ต่อ)

<b>run no.</b>	<b>removal efficiency from experimental (%)</b>	<b>removal efficiency from Model (%)</b>
22	52.74	51.44
23	54.80	54.23
24	54.89	57.01
25	81.11	80.75
26	85.55	83.54
27	87.10	86.32

#### 4. การหาค่าสถานะดำเนินการที่เหมาะสม (optimum condition)

การหาค่าสถานะดำเนินการที่เหมาะสมในการบำบัดโทลูอินโดยใช้ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันให้ได้ผลสูงสุด ขึ้นอยู่กับการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และขอบเขตที่สนใจ ซึ่งแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงฟังก์ชันเป้าหมาย และขอบเขตในการหาสถานะดำเนินการที่เหมาะสม

objective function	Min $f(x) = -y$
subject to	toluene removal model $y = 123.22 + 292.46x_3^2 - 0.08792x_1x_5 + 0.002272x_1x_4 - 282.51x_3 + 0.00479x_2$
	boundary limit
	$100 \leq x_1 \leq 300$
	$150 \leq x_2 \leq 1,500$
	$0.5 \leq x_3 \leq 0.8$
	$0 \leq x_4 \leq 40$
	$0.5 \leq x_5 \leq 1.0$

จากตารางที่ 7 พบว่ารูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายที่เลือกใช้อยู่ในรูปค่าที่น้อยที่สุด ดังนั้นในการหาสถานะดำเนินการที่เหมาะสมซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินสูงสุด จะกำหนดให้ฟังก์ชันเป้าหมายเท่ากับสมการที่มีค่าเป็นลบ เพื่อให้คำนวณได้ค่าที่สูงที่สุด ซึ่งวิธีแก้สมการเพื่อคำนวณหาสถานะดำเนินการที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม Matlab โดยเขียนฟังก์ชันในรูปของ M - file ซึ่งสถานะดำเนินการที่เหมาะสมคำนวณได้จากสมมติฐาน สมการควบคุมตัวแปรต่างๆ ขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดที่ตั้งไว้ ซึ่งผลการคำนวณหาสถานะดำเนินการที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินสูงสุดที่ได้แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงสถานะดำเนินการที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินสูงสุด ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Matlab

$Q_G$	$C_T$	$Q_L$	$C_{NaOCl}$	size of spray nozzle	toluene removal
-------	-------	-------	-------------	----------------------	-----------------

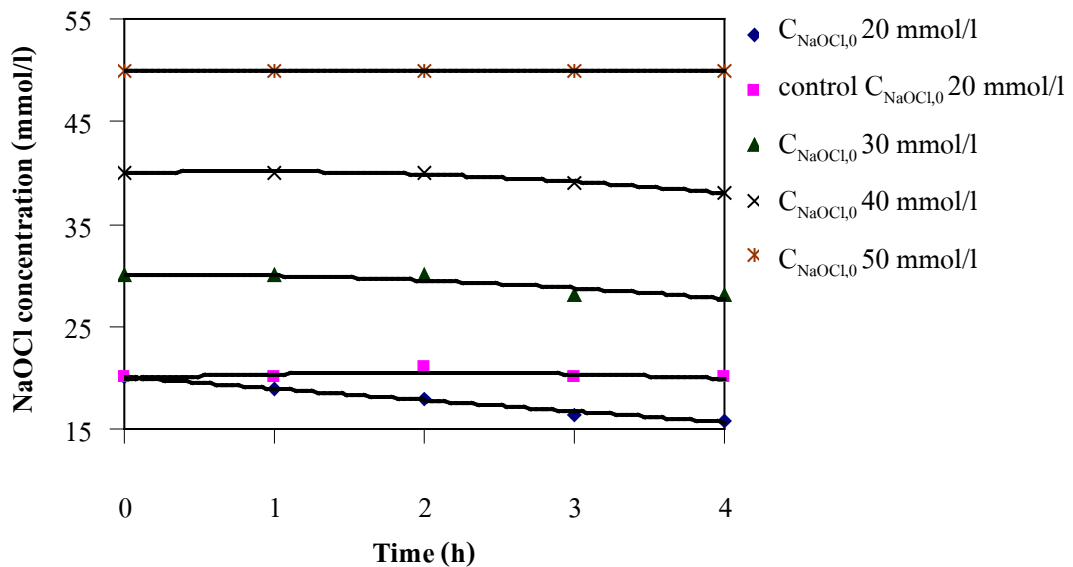
(m <sup>3</sup> /h)	(ppm)	(m <sup>3</sup> /h)	(mmol/l)	(mm)	(%)
100	1,500	0.8	20	0.5	91.7

จากตารางที่ 8 พบว่าสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินสูงสุดที่ร้อยละ 91.7 จะมีค่า  $Q_G$  เท่ากับ 100 m<sup>3</sup>/h และขนาดของหัวพ่นฝอยเท่ากับ 0.5 mm ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุด ค่า  $C_T$  เท่ากับ 1,500 ppm และ  $Q_L$  เท่ากับ 0.8 m<sup>3</sup>/h ซึ่งเป็นค่าที่ สูงที่สุด และค่า  $C_{NaOCl}$  เท่ากับ 20 mmol/l ซึ่งหากเพิ่ม  $C_{NaOCl}$  สูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสมนี้ ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินจะเพิ่มขึ้นได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อนำสภาวะดำเนินการที่ได้นี้ ไปทำการทดลองบำบัดจริงเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง พบว่าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินเท่ากับ ร้อยละ 90.1

## 5. การประยุกต์ใช้ระบบบำบัดกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดอื่น

### 5.1 การบำบัด MEK

ในระหว่างการบำบัด MEK โดยใช้ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันเบื้องต้นจะต้องทำการศึกษาการลดลงของ  $C_{NaOCl}$  ที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการบำบัดเช่นเดียวกับกรณีของการบำบัดโทลูอิน เพื่อควบคุมให้  $C_{NaOCl}$  มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง โดยผลการลดลงของ  $C_{NaOCl}$  ที่เวลาต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 32



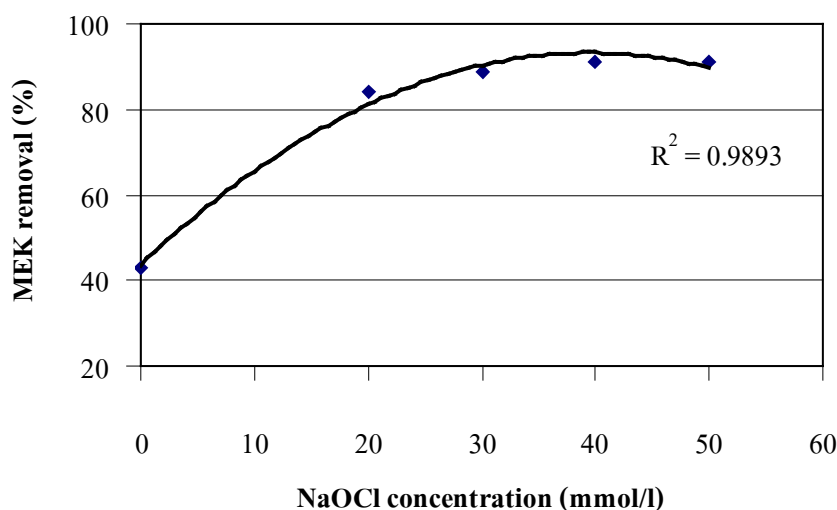
ภาพประกอบที่ 32 แสดงผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ  $C_{NaOCl}$  กับเวลาในระหว่างการ

บำบัด MEK ( $Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $C_{MEK} = 350 \text{ ppm}$ ,  $Q_L = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

$r_d = 0.5 \text{ mm}$ )

จากภาพประกอบที่ 32 เมื่อทำการบำบัด MEK โดยใช้ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน พบว่าการบำบัด MEK จะใช้ปริมาณโซเดียมไฮโปคลอไรท์มากกว่าโทลูอิน ซึ่งเป็นไปตามหลักปริมาณสารสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ MEK จะใช้โซเดียม-ไฮโปคลอไรท์มากกว่าโทลูอิน และสอดคล้องกับกฎอัตราแสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ MEK กับโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ในสมการที่ 15 (Thakatkaew, 2004) โดยอันดับปฏิกิริยาของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ MEK มีค่าสูงกว่าโทลูอิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้  $C_{NaOCl}$  เท่ากับ 20 mmol/l เมื่อเวลาในการบำบัดมากขึ้น  $C_{NaOCl}$  จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้ต้องมีการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรท์เพื่อควบคุมให้ความเข้มข้นมีค่าคงที่ 20 mmol/l ตลอดการทดลอง ส่วนที่  $C_{NaOCl}$  เท่ากับ 30 และ 40 mmol/l ในระหว่างการบำบัดความเข้มข้นจะลดลงเพียงเล็กน้อย และที่  $C_{NaOCl}$  เท่ากับ 50 mmol/l ค่าความเข้มข้นจะคงที่ตลอดการบำบัด ทั้งนี้เนื่องจาก  $C_{NaOCl}$  มีมากเกินไปต่อการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องมีการปรับเข้มข้นในระหว่างบำบัด

เมื่อพิจารณาผลของประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาในการบำบัด MEK พบว่า เมื่อควบคุม  $Q_G$ ,  $C_T$ ,  $Q_L$  และ  $r_d$  ให้มีค่าคงที่ ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ  $C_{NaOCl}$  มากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 33 ซึ่งเป็นไปตามกฎอัตราในสมการที่ 15 โดยจะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ MEK ขึ้นอยู่กับ  $C_{NaOCl}$  และความเข้มข้นของ MEK ( $C_{MEK}$ ) แต่เมื่อ  $C_{NaOCl}$  เพิ่มสูงเกินกว่า 30 mmol/l ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากปริมาณของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีมากเกินไป นอกจากนั้นยังพบว่าที่สภาวะเดียวกันประสิทธิภาพในการบำบัด MEK มีค่าสูงกว่าโทลูอินเล็กน้อย เนื่องจาก MEK สามารถละลาย และดูดซึมในสารดูดซึมได้ดี ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโซเดียมไฮโปคลอไรท์ได้มากกว่าโทลูอินซึ่งละลายน้ำ ได้น้อย



ภาพประกอบที่ 33 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด MEK ที่  $C_{NaOCl}$  ในช่วง 0 – 50 mmol/l  
 ( $Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $C_{MEK} = 350 \text{ ppm}$ ,  $Q_L = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r_d = 0.5 \text{ mm}$ )

$$-r_{MEK} = kC_{MEK}^{0.55} C_{NaOCl}^{0.22} \quad (15)$$

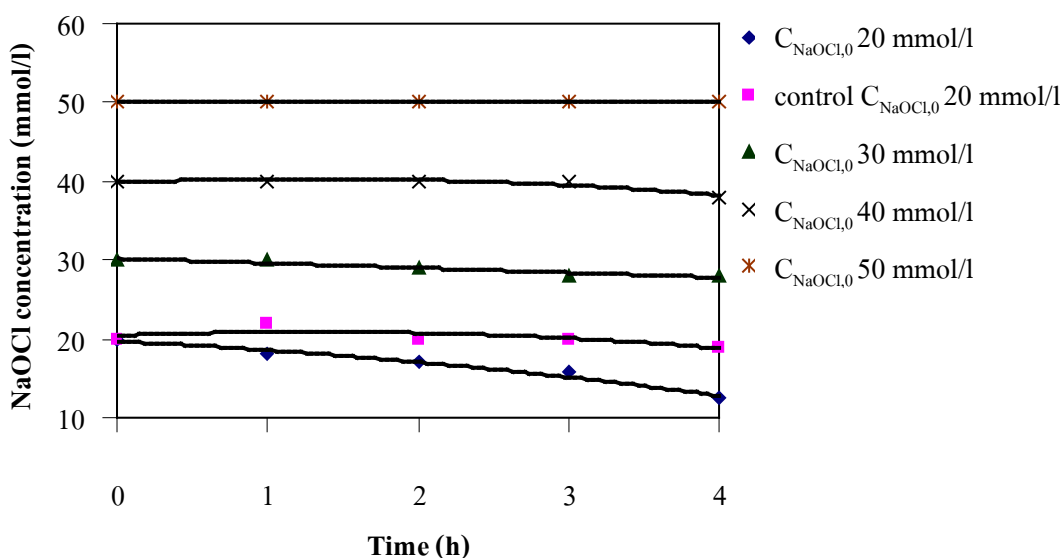
เมื่อ  $-r_{MEK}$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ MEK

$K$  = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

$C_{MEK}$  = ความเข้มข้นของ MEK

## 5.2 การบำบัดอะซิโตน

ในการบำบัดอะซิโตนจะศึกษาการลดลง  $C_{\text{NaOCl}}$  ที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการบำบัด เพื่อควบคุมให้  $C_{\text{NaOCl}}$  มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง โดย  $C_{\text{NaOCl}}$  ที่ใช้ในการบำบัดอะซิโตนรวมถึง ตัวแปรดำเนินการอื่นๆ จะเหมือนกับกรณีการบำบัด MEK โดยผลการลดลงของ  $C_{\text{NaOCl}}$  ที่ เวลาต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 34

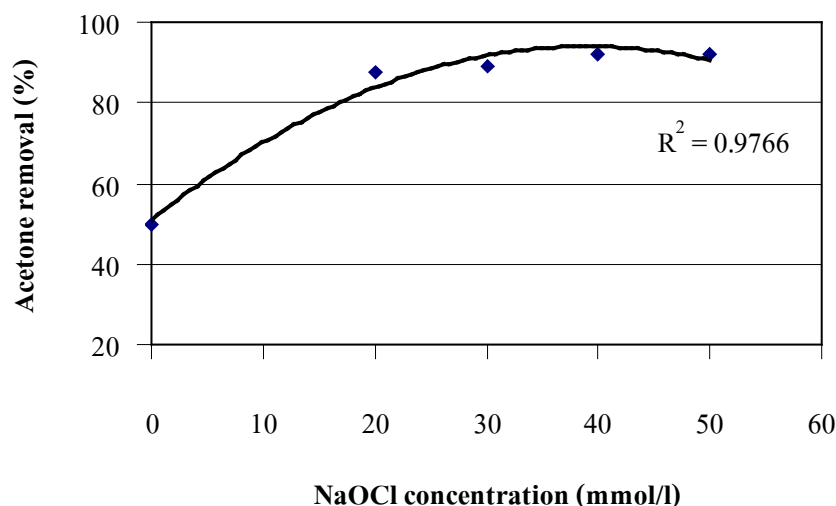


ภาพประกอบที่ 34 แสดงผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ  $C_{\text{NaOCl}}$  กับเวลา ในระหว่างการบำบัดอะซิโตน ( $Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $C_A = 350 \text{ ppm}$ ,  $Q_L = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r_d = 0.5 \text{ mm}$ )

จากภาพประกอบที่ 34 เมื่อทำการบำบัดอะซิโตนโดยใช้ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน พบว่าแนวโน้มการลดลงที่เวลาต่างๆ ของ  $C_{\text{NaOCl}}$  มีค่าใกล้เคียงกับการบำบัด MEK เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกลุ่มคีโตนเช่นเดียวกัน โดยที่  $C_{\text{NaOCl}}$  เท่ากับ 20 mmol/l จะต้องทำการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรท์ลงในสารดูดซึมเพื่อควบคุมให้ความเข้มข้น มีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการบำบัด ส่วนที่  $C_{\text{NaOCl}}$  สูงกว่า 20 mmol/l ไม่จำเป็นต้องมีการปรับความเข้มข้นในระหว่างบำบัด เนื่องจากความเข้มข้นที่ใช้มีมากเกินไปต่อการเกิดปฏิกิริยา



เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาในการบำบัดอะซิโตน พบว่าเมื่อควบคุม  $Q_G$ ,  $C_T$ ,  $Q_L$  และ  $r_d$  ให้มีค่าคงที่ ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรท์มากขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรท์เพิ่มสูงเกินกว่า 30 mmol/l ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 35 เนื่องจาก  $C_{NaOCl}$  ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีมากเกินไป นอกจากนั้นที่สภาวะเดียวกันยังพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิโตน มีค่าสูงกว่า MEK และ โทลูอิน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 9 เนื่องจากอะซิโตนมีความสามารถในการดูดซึม โดยน้ำได้ดีกว่ากรณีของ MEK และ โทลูอิน อีกทั้งอะซิโตนมีเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกลุ่ม คีโตนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโซเดียมไฮโปคลอไรท์ได้ดี (Thakatkaew, 2004)



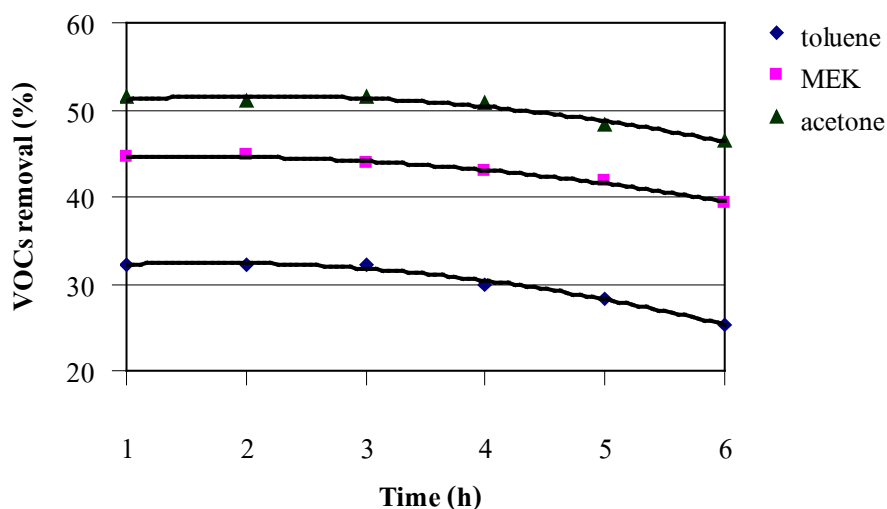
ภาพประกอบที่ 35 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิโตนที่  $C_{NaOCl}$  ในช่วง 0 – 50 mmol/l  
( $Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $C_A = 350 \text{ ppm}$ ,  $Q_L = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r_d = 0.5 \text{ mm}$ )

ตารางที่ 9 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอิน MEK และอะซิโตน

operating conditions					removal efficiency (%)		
$Q_G$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	$C_T$ (ppm)	$Q_L$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	$C_{NaOCl}$ (mmol/l)	Nozzle size (mm)	toluene	MEK	acetone
175	350	0.8	20	0.5	87.10	84.08	87.79
175	350	0.8	30	0.5	87.72	88.76	89.40
175	350	0.8	40	0.5	87.80	91.11	92.03

## 6. ผลจากการดูดซึม (absorption) และความสามารถในการละลาย (solubility) ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วย wet scrubber

ในระบบบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยใช้ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน ประสิทธิภาพการบำบัดนอกจากจะขึ้นกับปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้ว ผลจากการแพร่ ซึ่งเป็นกลไกเบื้องต้นของระบบบำบัดสารปนเปื้อนในรูปของแก๊ส ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดอีกด้วย โดยกลไกการแพร่จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซึม และความสามารถในการละลายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดในสารดูดซึม ดังนั้นจึงมีการศึกษาผลของปัจจัยดังกล่าวต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ โดยใช้ น้ำ เป็นสารดูดซึมแทนสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ซึ่งในการบำบัด โทลูอีน MEK และอะซิโตน ด้วยน้ำ ที่เวลาต่างๆ เมื่อ  $Q_G$ ,  $C_{VOCs}$ ,  $Q_L$  และ  $r_d$  คงที่ แสดงดังภาพประกอบที่ 36



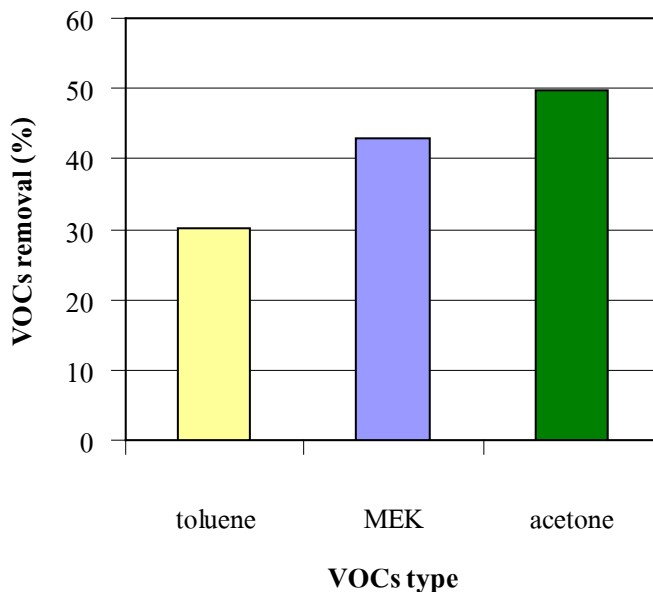
ภาพประกอบที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

$$\text{ชนิดต่างๆ กับเวลา } (Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}, C_{VOCs} = 350 \text{ ppm}, Q_L = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}, r_d = 0.5 \text{ mm})$$

จากภาพประกอบที่ 36 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอีน MEK และอะซิโตน ที่เวลาต่างๆ มีความคล้ายคลึงกัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง เมื่อเวลาในการบำบัด มากขึ้น โดยเมื่อเข้าสู่ช่วงเวลาที่ 4 จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากระบบ wet scrubber ที่ใช้ในการ

บำบัด มีการหมุนเวียนนำสารดูดซึ่มกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ละเอียด ง่ายในสารดูดซึ่มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการบำบัดผ่านไป ซึ่งทำให้ความสามารถในการ กักเก็บ สารอินทรีย์ระเหยง่ายลดลง ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลงด้วยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาในการบำบัดโทลูอีน MEK และอะซิโตน เมื่อใช้น้ำเป็นสารดูดซึ่ม พบว่าอะซิโตนจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณ ร้อยละ 50 ซึ่งสูงกว่า MEK และโทลูอีนตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 37 ทั้งนี้เนื่องจาก อะซิโตนมีความสามารถในการดูดซึ่มในน้ำได้ดีกว่า MEK และโทลูอีน โดยความสามารถในการดูดซึ่มด้วยน้ำ มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการละลายของสารแต่ละชนิด โดยสารที่ ละลายน้ำได้ดีจะสามารถดูดซึ่มในน้ำได้มากกว่าสารที่ละลายในน้ำได้น้อย ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำของสารชนิดต่างๆ พิจารณาได้จากค่า Henry's law constant หากค่า Henry's law constant สูงความสามารถในการละลายน้ำจะต่ำ สำหรับค่า Henry's law constant ของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ที่ทำการศึกษา แสดงในตารางที่ 10



ภาพประกอบที่ 37 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ โดยใช้น้ำ

$$\text{เป็นสารดูดซึ่ม } (Q_G = 175 \text{ m}^3/\text{h}, C_{\text{vocs}} = 350 \text{ ppm}, Q_L = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}, r_d = 0.5 \text{ mm})$$

ตารางที่ 10 แสดงค่า Henry's law constant

compounds	chemical formula	Henry's law constant at 25 °C (atm m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )
toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	6.67x10 <sup>-3</sup>
MEK	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	5.00x10 <sup>-5</sup>
acetone	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	3.33x10 <sup>-5</sup>

ที่มา : Perry, R (1984)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอิน MEK และอะซิโตน ด้วยระบบ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับระบบ wet scrubber แบบทั่วไปซึ่งใช้น้ำเป็นสารดูดซับพบว่า ประสิทธิภาพของ wet scrubber แบบทั่วไปจะมีค่าต่ำกว่า ดังแสดงใน ตารางที่ 11 เนื่องจาก wet scrubber แบบทั่วไปจะอาศัยกลไกการแพร่ และการดูดซับในการบำบัดสารปนเปื้อน ซึ่งเมื่อเวลาในการบำบัดผ่านไป ระบบมีการหมุนเวียนสารดูดซับที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ ทำให้มีปริมาณสารปนเปื้อนในสารดูดซับสูงขึ้น จนถึงจุดอิ่มตัวที่ไม่สามารถ ดูดซับสารปนเปื้อนไว้ได้อีก ความสามารถในการบำบัดจะลดลง การเติมโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ลงในสารดูดซับจะเป็นการนำเอาปฏิกิริยาออกซิเดชันมาใช้ร่วมกับระบบบำบัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้สูงขึ้น โดยอนุภาคของสารปนเปื้อนนอกจากจะถูกดูดซับแล้ว ยังสามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ได้อีกทางหนึ่งด้วย

ตารางที่ 11 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ โดยใช้ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันเปรียบเทียบกับระบบ wet scrubber แบบทั่วไป

VOCs type	removal efficiency (%)	
	wet scrubber use water as scrubbing liquid	wet scrubber with oxidation reaction (C <sub>NaOCl</sub> 20 mmol/l)
toluene	30.03	87.1
MEK	42.88	84.08
acetone	49.89	87.79

## 7. ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นระหว่างสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ กับโซเดียมไฮโปคลอไรต์

ในการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นระหว่างการบำบัดสารอินทรีย์ ระเหยง่ายชนิดต่างๆ โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์เป็นสารออกซิแดนต์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย และละลายในสารดูดซึมได้ดี จึงไม่สามารถหาเทคนิคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงใช้ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้จากการตรวจเอกสาร ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโทลูอีนกับสารออกซิแดนต์ ได้แก่ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO<sub>4</sub>) สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 16 โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ กรดเบนโซอิก (<http://chemistry51-2.tripod.com/chapter.html>) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fan และคณะ (2004) ซึ่งศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโทลูอีนกับ ออกซิเจนในอากาศ โดยได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดเบนโซอิกเช่นเดียวกัน

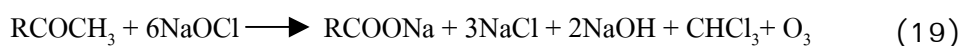
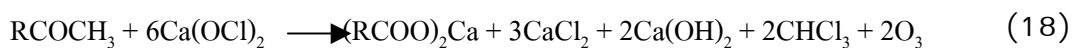


จากการตรวจเอกสารต่างๆ สามารถแสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโทลูอีน กับโซเดียมไฮโปคลอไรต์ดังสมการที่ 17 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย กรดเบนโซอิก โซเดียม-คลอไรด์ และน้ำ



Hurd and Thomas (1993) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารในกลุ่มคีโตน และไฮโปคลอไรต์ (OCI) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นเกลือของกรดคาร์บอกซิลิก และคลอโรฟอร์ม โดยใช้ MEK และแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Ca(OCl)<sub>2</sub>) พบว่าได้แคลเซียม-ไพโรไพโอเอต (Calcium propionate) แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ คลอโรฟอร์ม และโอโซนเป็นผลิตภัณฑ์ ดังสมการที่ 18 ซึ่งในทำนองเดียวกันหากใช้ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ในการทำปฏิกิริยาแทนแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ สามารถแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 19 โดย

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ โซเดียมโพรพาโนเอต (Sodium propanoate) โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ คลอโรฟอร์ม และโอโซน



เมื่อ R คือ หมู่  $\text{C}_2\text{H}_5^-$

ในส่วนของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างอะซิโตน และโซเดียมไฮโปคลอไรด์ มีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีปฏิกิริยาออกซิเดชันของ MEK เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย ในกลุ่มเดียวกัน โดยมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ โซเดียมอะซิเตต (Sodium acetate) โซเดียม-คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ คลอโรฟอร์ม และโอโซน ดังแสดงในสมการที่ 20 (Mann and Saunders, 2002)

