

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

4.1 การเลือกสัดส่วนของเทียนโดยศึกษาจากการกระจายตัวของ Persulfate

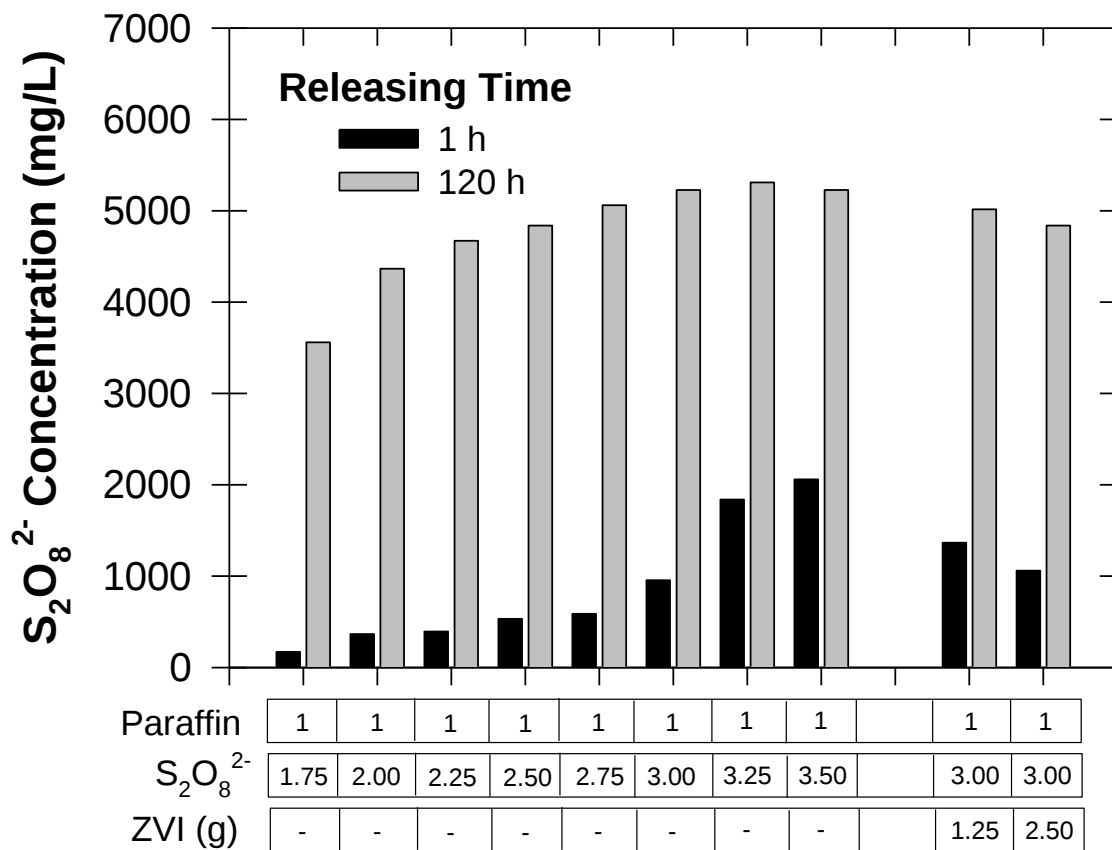
การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเทียนเปอร์ซัลเฟตโดยการปรับอัตราส่วนผสมระหว่าง จี๊ฟี่ และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดโดยทำการศึกษาจากการตรวจติดตามการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตในการทดลองแบบ Batch ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบอัตราการกระจายตัวเป็นระยะเวลา 120 ชั่วโมง และได้รายงานผลการทดลองแบ่งเป็นในช่วงสั้น (เช่น 0-1 ชั่วโมง) และในช่วงยาว (เช่น 24-120 ชั่วโมง) (ข้อมูลแสดงในรูปที่ 13; รูปที่ 14 และตารางที่ 2) การทดลองในช่วงแรกมีเพียงอัตราส่วนผสมสามแบบ (จี๊ฟี่ : เปอร์ซัลเฟต; 1:3.00 1:3.25 และ 1:3.50) ซึ่งจากผลการทดลองแสดงความแตกต่างในอัตราการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟต ต่อการทดลองถัดมา ผู้วิจัยได้ทำการปรับอัตราส่วนของเทียนโดยเพิ่มปริมาณของเปอร์ซัลเฟตเป็นสองเท่า (จี๊ฟี่ : เปอร์ซัลเฟต; 1:3.50 และ 1:1.75) พบว่าปริมาณของเปอร์ซัลเฟตที่กระจายตัวออกมานั้นสูงกว่าถึง 10 เท่า (ข้อมูลแสดงในรูปที่ 13; รูปที่ 14A) ในการศึกษาพบว่าการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตออกจากเทียนนั้นผลการทดลองคล้ายกับที่มีในรายงานอื่น (Dhananjeyan et al, 2000; Kang et al., 2004; Lee and Schwartz, 2007a, 2007b) หลังจากการกระจายตัวในช่วงแรกพบว่าเปอร์ซัลเฟตมีความเข้มข้นที่คงที่ที่เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง ซึ่งคล้ายกับ Liang et al. (2011a) ได้รายงานไว้ว่าการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 6 วันแรก หรือประมาณ 144 ชั่วโมง ในขณะที่การกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตในช่วงแรกจะแปรผันตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ โดยที่ทุกอัตราส่วนจะพบว่าความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตนั้นจะอยู่ในช่วง 4,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เวลา 120 ชั่วโมง (รูปที่ 13) ยกเว้นที่อัตราส่วนที่ต่ำที่สุด (1:1.75) เท่านั้นที่การกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตไม่สูงเท่าอัตราส่วนอื่น นอกจากนี้ได้มีรายงานอื่นๆ แสดงว่าที่ความเข้มข้นนี้เพียงพอในการกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ในสารละลายเอเคียสได้ (Huang et al., 2005; Tsitonaki et al., 2010; Petri et al., 2011; Xu et al., 2012)

เพื่อให้การสร้างแนวำบดัของเทียนมีความสมบูรณ์ในการบำำบดัสารปนเปื้อนในน้ำำได้ดินเทียนเปอร์ซัลเฟตควรจะสามารลปลดปล่อยเปอร์ซัลเฟตได้อย่างต่อเนื่องและควรคงสภาพรูปร่างเดิม

เมื่ออยู่ในหลุมของน้ำใต้ดิน ถึงแม้ว่าอัตราส่วนที่สูงที่สุดของเปอร์ซัลเฟตที่ 1:3.50 สามารถที่จะปลดปล่อยเปอร์ซัลเฟตได้สูงเพียงพอ แต่ที่อัตราส่วนนี้เทียนไม่สามารถคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ดังนั้นจากรูปที่ 13 ผู้วิจัยเลือกอัตราส่วนที่ 1:3.0 ที่ทั้งสามารถคงรูปเดิมได้และมีการปลดปล่อยปริมาณเปอร์ซัลเฟตที่สูงเพียงพอ

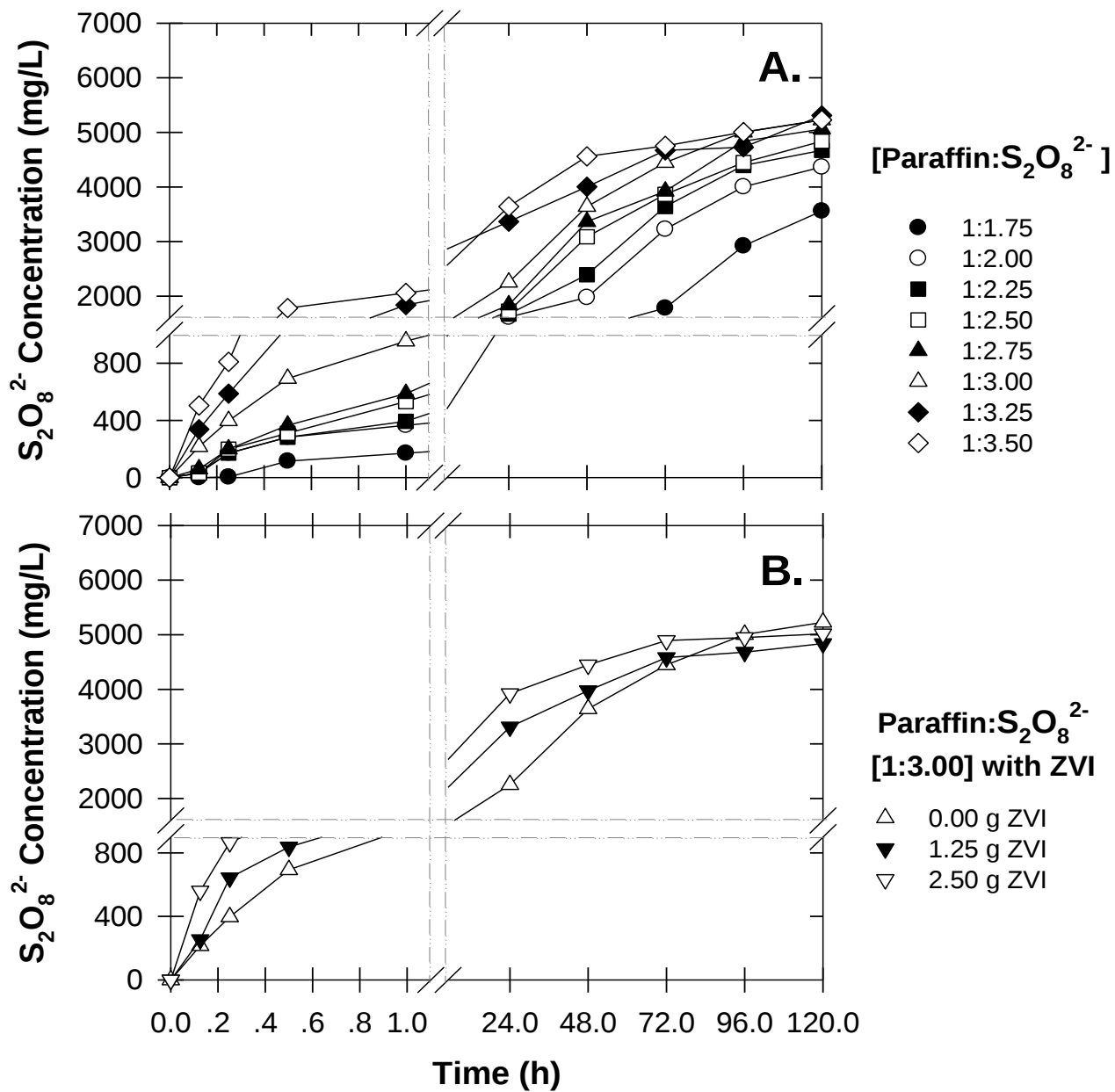
หลังจากการเลือกอัตราส่วนระหว่างซีฟิ่งและเปอร์ซัลเฟตในการสร้างเทียนได้แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับตัวกระตุ้น (เช่น ZVI) ในขณะที่เปอร์ซัลเฟตถูกปล่อยออกจากด้านบนของเทียนเปอร์ซัลเฟตจะถูกกระตุ้นด้วย ZVI ที่ถูกปล่อยออกจากด้านล่าง เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากระตุ้นจะมีสองปฏิกิริยาเกิดขึ้นคือปฏิกิริยาการผลิตอนุมูลอิสระของซัลเฟต (สมการที่ 2) และตัวกำจัดอนุมูลอิสระ (สมการที่ 3) ดังนั้นปริมาณของ ZVI ที่เหมาะสมจึงเป็นส่วนที่สำคัญในการป้องกันการเกิดตัวกำจัดอนุมูลอิสระ (Tsitonaki et al., 2010; Liang et al., 2011; Li et al., 2014) ในการสร้าง SO_4^- ปริมาณของเปอร์ซัลเฟตและ ZVI จึงไม่จำเป็นต้องเท่ากัน ในรายงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าปริมาณ Fe^{2+} ที่มากเกินไปนั้นสามารถลดปริมาณ SO_4^- ลงได้ นอกจากนี้ปริมาณของ Fe^{2+} ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นปริมาณที่เพียงพอที่จะกระตุ้นการผลิตเปอร์ซัลเฟตได้

ในการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของ ZVI ผู้วิจัยได้เลือกเทียนที่อัตราส่วน 1:3.0 และทำการศึกษาปริมาณ ZVI ที่มีน้ำหนักแตกต่างกันคือ 1.25 และ 2.50 กรัม คิดเป็น 25% และ 50% ของน้ำหนักเทียน จากผลการทดลองพบว่า ZVI ที่ปริมาณ 2.50 กรัม นั้นสามารถปลดปล่อยปริมาณเปอร์ซัลเฟตออกจากเทียนได้สูงถึง 2 เท่ามากกว่าเทียนเปอร์ซัลเฟตที่ไม่มี ZVI ที่เวลา 0.25 ชั่วโมง (รูปที่ 14B) โดยอธิบายได้ว่า ZVI ไม่แต่เพียงกระตุ้นเปอร์ซัลเฟต ในสารละลายแต่ยังสามารถกระตุ้นการผลิต SO_4^- ที่ผิวเทียนได้ด้วย ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการกระจายตัวต่อไปพบว่าการใช้ปริมาณเหล็กที่ 2.5 กรัม และไม่ใช้เลยพบว่าในช่วงแรกจะมีปริมาณของเปอร์ซัลเฟตแตกต่างกันมากแต่จะไม่มี ความแตกต่างเมื่อเวลาผ่านไป 120 ชั่วโมง



Chemical mixtures (Paraffin: $S_2O_8^{2-}$: ZVI)

รูปที่ 13 แสดงความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่ถูกปล่อยออกมาจากเทียนเปอร์ซัลเฟตและเทียนเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ร่วมกับ ZVI ที่เวลา 1 ชั่วโมงและ 120 ชั่วโมง



รูปที่ 14 แสดงความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่ถูกปล่อยออกมาจากเทียนเปอร์ซัลเฟตและเทียนเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ร่วมกับ ZVI

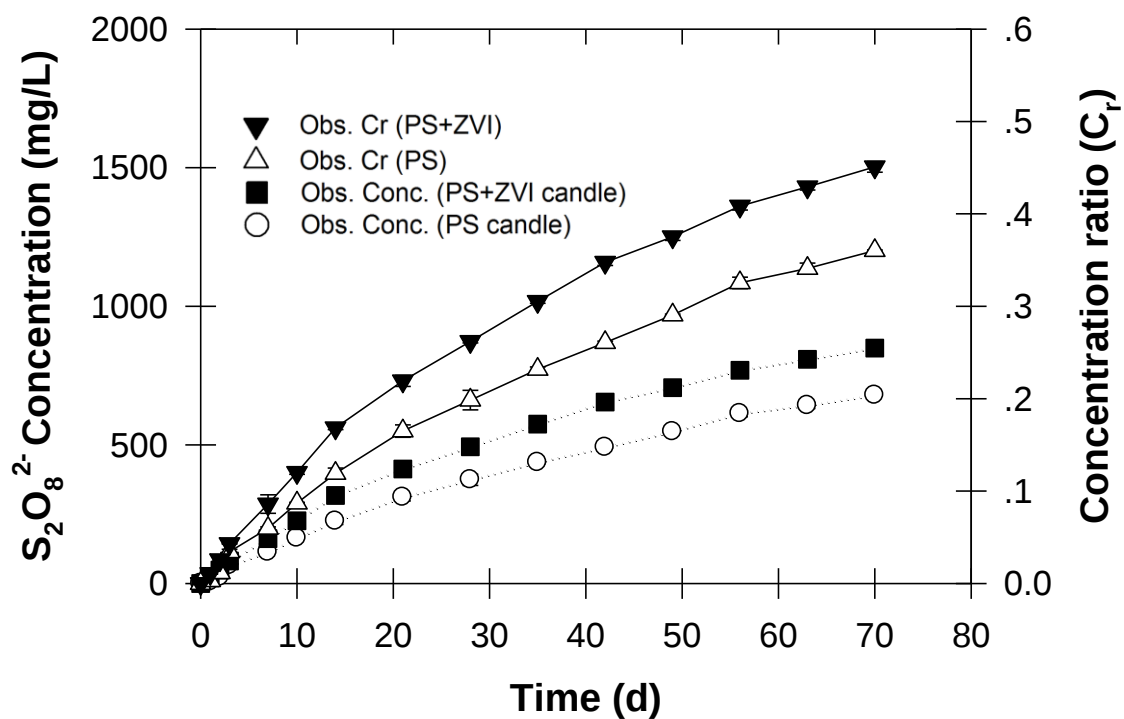
ตารางที่ 2. แสดงความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเฉลี่ยที่ถูกปล่อยออกมาจากเทียนเปอร์ซัลเฟต

Candles (symbol)	Mixture (Paraffin : $S_2O_8^{2-}$)	ZVI candle	Average PS release rate (mg/d)	
			Release duration	
			Short term (0–1 h)	Long term (24–120 h)
●	1:1.75	-	37.04	298.51
○	1:2.00	-	55.56	343.75
■	1:2.25	-	60.19	375.00
□	1:2.50	-	83.33	388.89
▲	1:2.75	-	87.96	402.78
△	1:3.00	-	123.15	371.53
◆	1:3.25	-	250.00	243.06
◇	1:3.50	-	259.26	197.92
▼	1:1.75	1.25 g	125.09	190.97
▽	1:1.75	2.50 g	134.26	136.81

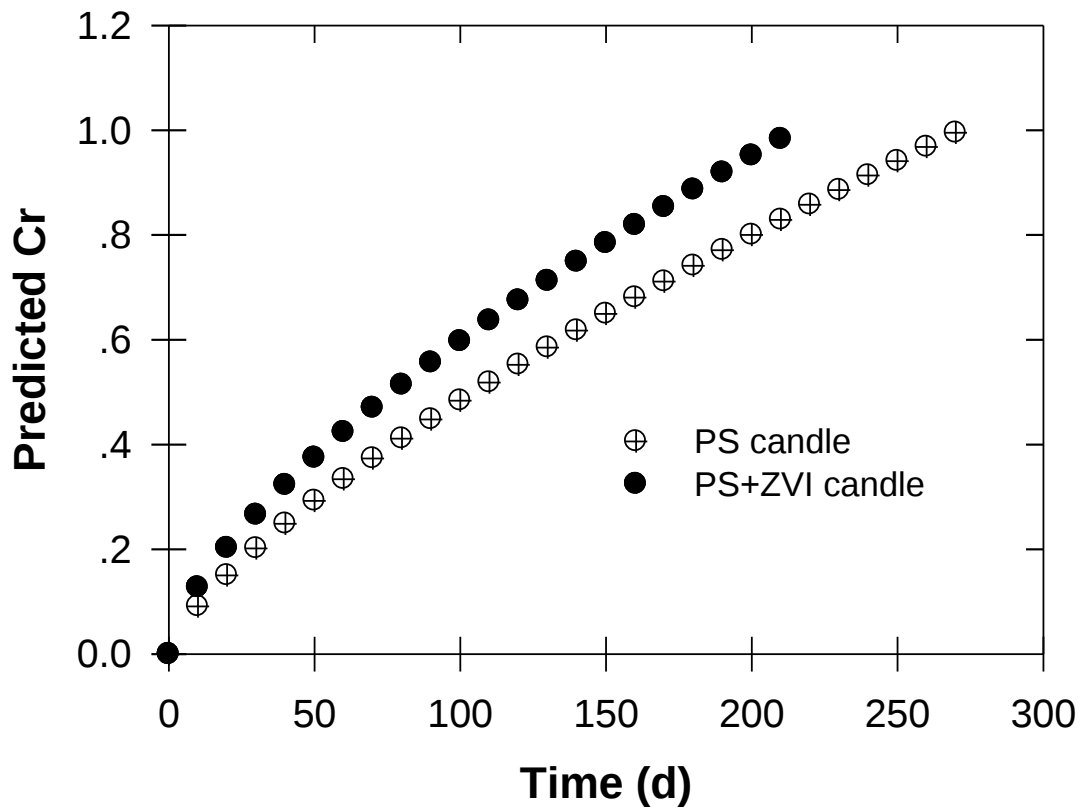
หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางนี้อ้างอิงมาจาก Legend ในกราฟรูปที่ 14

4.2 การประมาณอายุของ Persulfate candle

ข้อดีของการใช้เทียนเปอร์ซัลเฟตในการปล่อยสารเปอร์ซัลเฟตอย่างช้าๆ นั้นเป็นประโยชน์อย่างมากในการประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารเคมีตกค้างในสิ่งแวดล้อมในภาคสนาม ดังนั้นจำเป็นต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของเทียนเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ร่วมกับ ZVI จากผลการทดลองแสดงว่าความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตสามารถสูงขึ้นไปได้ถึง 850 mg/L ภายใน 70 วัน (ดังแสดงในรูปที่ 15) การทดลองนี้ได้ศึกษาในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองก่อนหน้านี้เนื่องจากเป็นการทดลองในขนาดที่ใหญ่กว่าคือ 20 ลิตร เราใช้ข้อมูล Cr จากการทดลองการประมาณอายุของเทียน และทำการคำนวณโดยใช้วิธีของ Kang et al. 2004 ผลการทดลองแสดงว่าขนาดของเทียนและสัดส่วนของเทียนเปอร์ซัลเฟตและ ZVI ควรจะปลดปล่อยเปอร์ซัลเฟตไปยังบริเวณผิวเทียน (เช่น $Cr = 1.0$) ที่เวลา 210 และ 270 วัน สำหรับเทียน PS (รูปที่ 16) เปรียบเทียบกับการศึกษาการประมาณอายุของเทียนเปอร์ซัลเฟตกับเทียนเปอร์แมงกานีสของ Christenson et al. 2012 ผู้วิจัยพบว่ารูปแบบการปลดปล่อยของสารออกซิแดนต์เหมือนกัน อย่างไรก็ตามอัตราส่วนการปลดปล่อยสารออกซิแดนต์ทั้งสองรายงานการทดลองไม่เป็นสัดส่วนกันเนื่องจากมีความแตกต่างในระบบที่ทำการศึกษาและน้ำหนักของออกซิแดนต์ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีผู้วิจัยได้รายงานถึงการใช้วัสดุที่แตกต่างกันทดแทนขี้ผึ้งในการใช้เป็นวัสดุที่ผสมรวมกับเปอร์ซัลเฟต เช่นการใช้ซีเมนต์ผสมทรายและน้ำ (Liang et al. 2011a) และ Stearic acid (Yuan et al. 2013) ถึงแม้ว่าจะมีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันแต่วัสดุเหล่านี้สามารถที่จะปลดปล่อยเปอร์ซัลเฟตได้ในระยะยาว



รูปที่ 15 แสดงความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และความเข้มข้นแบบอัตราส่วน (Cr) ในน้ำ



รูปที่ 16 แสดงการคำนวณค่า Cr เป็นระยะเวลา 2 ปี

4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

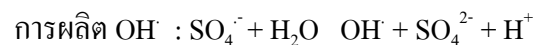
ในการใช้เทียนเปอร์ซัลเฟตเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนจะมี 2 คำถามเกิดขึ้นดังนี้ อัตราส่วนระหว่างเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ร่วมกับ ZVI ควรจะเป็นเท่าใด และเทียนนี้จะสามารถบำบัดเมธิลออเรนจ์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้หรือไม่ ดังนั้นเพื่อที่จะตอบคำถามเหล่านี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการกำจัดเมธิลออเรนจ์โดยใช้เทียนเปอร์ซัลเฟตซึ่งมีการปรับอัตราส่วนของ ZVI ผลการทดลองแสดงว่าการบำบัดเป็นรูปแบบ first-order ซึ่งการบำบัดจะเร็วขึ้นตามปริมาณของ ZVI ที่เพิ่มขึ้น ($K = 0.029 \text{ h}^{-1}$, 0 g ZVI ; $k = 0.048 \text{ h}^{-1}$, 1.25 g ZVI ; $k = 0.086 \text{ h}^{-1}$, 2.50 g ZVI) (ดังแสดงในรูปที่ 17) เปอร์ซัลเฟตสามารถลดความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ได้จากความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไปจนเกือบหมดที่ 200 ชั่วโมง (รูปที่ 17) ในขณะที่เมื่อมีการใช้เปอร์ซัลเฟตร่วมกับ ZVI จะสามารถกำจัดเมธิลออเรนจ์ได้ภายใน 50 ชั่วโมงเมื่อใช้ ZVI ขนาด 2.50 กรัม และกำจัดได้หมดภายใน 90 ชั่วโมงเมื่อใช้ ZVI ขนาด 1.25 กรัม จากผลการทดลองเหล่านี้ยืนยันว่าเมื่อมีการใช้เทียนเปอร์ซัลเฟตร่วมกับ ZVI ขนาด 2.50 กรัม จะสามารถผลิตเปอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้นมากกว่า 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เวลา 50 ชั่วโมง (รูปที่ 14B) ซึ่งเพียงพอที่จะกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้ (Huang et al., 2005; Tsitonaki et al., 2010; Petri et al., 2011; Xu et al., 2012)

ดังนั้นเมื่อมีการนำเทียนเปอร์ซัลเฟตที่มี ZVI ผสมใส่ลงไปในสารละลายจะเกิดการปลดปล่อยเปอร์ซัลเฟตในปริมาณที่มาก (รูปที่ 14B) ปริมาณของเมธิลออเรนจ์ไม่ได้ลดลงอย่างรวดเร็วตามที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งการลดลงเป็นอัตราแบบ first-order หลังจากถูกบำบัดไปแล้ว 3 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 17 ในครั้งแรกผู้วิจัยคาดว่าอาจมีการดูดซับของเมธิลออเรนจ์บนขี้ผึ้ง ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองคู่ขนานโดยใช้การทดลองแบบควบคุมโดยใช้ KCl แทนที่เปอร์ซัลเฟต ผลการทดลองแสดงว่าไม่มีการดูดซับของเมธิลออเรนจ์ ซึ่ง Rauscher et al. (2012) และ Kambhu et al. (2012) ได้ทำการทดลองแบบเดียวกันพบว่าไม่มีการดูดซับเช่นเดียวกัน นอกจากนั้น Rauscher et al. (2012) ยังพบว่า phenanthrene เกิดการดูดซับบนเทียนเปอร์แมงกานีสและเมื่อเกิดการออกซิเดชันแล้วจะปลดปล่อยสารอนุพันธ์กลับออกมาในสารละลาย

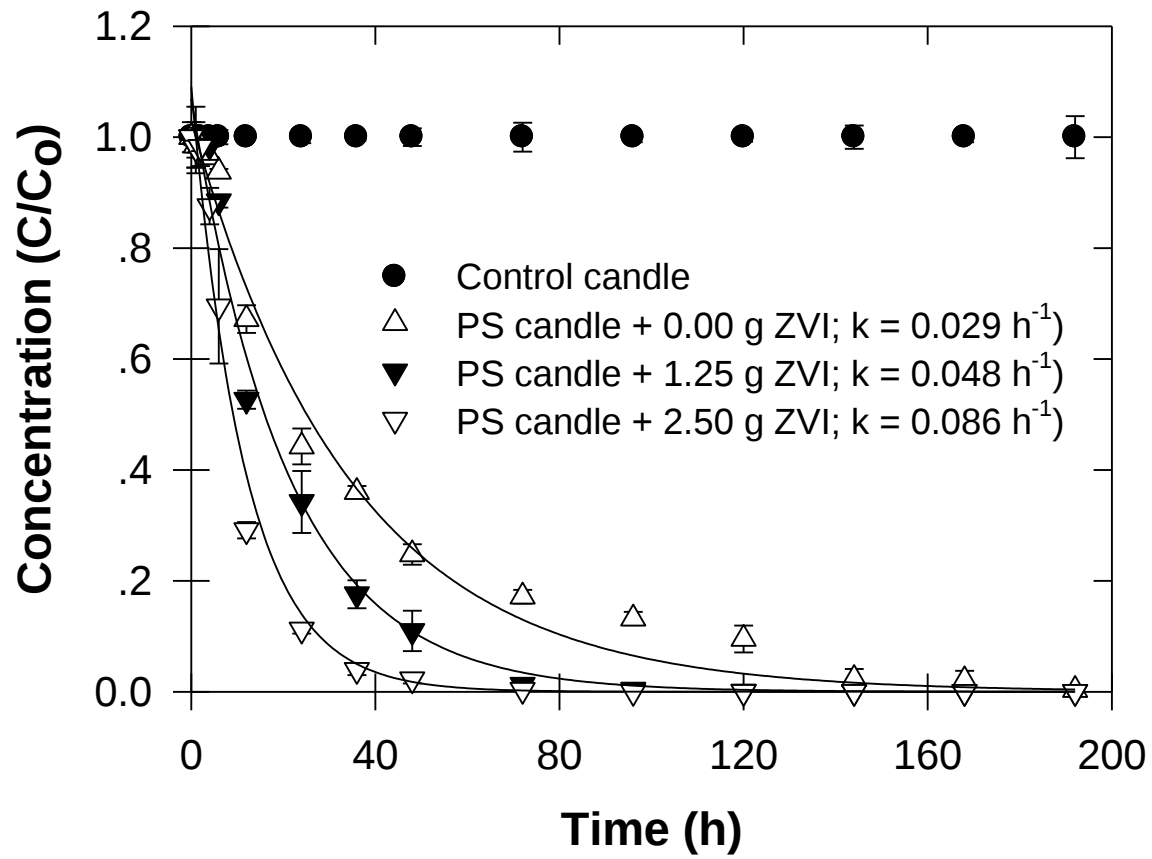
การเปลี่ยนแปลงของ pH ได้ถูกศึกษาเป็นเวลา 360 ชั่วโมง (ตารางที่ 3) ผลการทดลองแสดงว่าค่า pH ลดลงจาก 6.7 ไปเป็น 2.8 ในการบำบัดเมธิลออเรนจ์ด้วยเทียนเปอร์ซัลเฟตและ pH ลดลงไปถึง

2.3 เมื่อทำการบำบัดเมธิลออเรนจ์ด้วยเทียนที่มีการผสมกันระหว่างเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ร่วมกับ ZVI การลดลงของ pH นี้เกิดจากการผลิตซัลเฟตและกรดซัลฟูริก (House, 1962; Petri et al. 2011) ในทางกลับกันพบว่า pH เพิ่มขึ้นจาก 6.7 ไปเป็น 7.1 เมื่อมีการใช้เปอร์ซัลเฟตร่วมกับ ZVI (ข้อมูลไม่ได้นำมาแสดง) ความแตกต่างนี้มาจากการผลิตเปอร์ซัลเฟตไอออนอย่างต่อเนื่องและอนุมูลอิสระของซัลเฟต ซึ่งเป็นข้อดีของการใช้เทียนที่มีการปล่อยอย่างช้าๆ สารละลายได้รับปริมาณของอนุมูลอิสระของซัลเฟตที่มากเกินไปส่งผลให้ pH ลดลง เนื่องมาจากการเกิด HSO_4^- (Liang และ Lai, 2008) ถึงแม้ว่า pH จะลดลงเนื่องจากการใช้เทียนเปอร์ซัลเฟตและ ZVI แต่ในน้ำธรรมชาติสามารถที่จะปรับ pH ขึ้นมาจนถึง pH ปกติ (ITRC, 2005)

ในระบบการบำบัดของเมธิลออเรนจ์โดยใช้เทียนเปอร์ซัลเฟตและ ZVI พบว่าเมธิลออเรนจ์มีสีที่ลดลงในระหว่างการทดลอง ได้มีการเสนอว่าการลดลงของสีเมธิลออเรนจ์เป็นผลมาจากการทำลายของพันธะ azo ($-\text{N}=\text{N}-$) ในหมู่โครโมฟอร์ของสีของ azo โดยอนุมูลอิสระของซัลเฟต (Gomathi Devi et al. 2009; Li et al. 2014; Rodriguez et al. 2014) ในอีกกลไกหนึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระของซัลเฟตในการผลิตอนุมูลอิสระของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลดังแสดงในสมการข้างล่าง (Waldemer et al. 2007)



การผลิต $\text{OH}^\cdot$ จะทำให้ pH ของสารละลายลดลงดังแสดงในตารางที่ 3 ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาจะช้า ได้มีรายงานการวิจัยที่ผ่านมาแสดงว่าพันธะเอโซของเมธิลออเรนจ์เริ่มต้นแตกหักที่เวลา 25 นาที หลังจากเริ่มการทดลอง (Nadepour et al. 2013) ดังนั้นทางผู้วิจัยเสนอว่าการแตกหักพันธะ $-\text{N}=\text{N}-$ ในโมเลกุลของเมธิลออเรนจ์โดยเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นโดย ZVI นั้นเหมือนกับการแตกพันธะของเอโซในสี Orange G ซึ่งเป็นหนึ่งในสีของสีเอโซ (Rodriguez et al., 2014)



รูปที่ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อถูกบำบัดด้วยเทียนเปอร์ซัลเฟตที่มีการใช้ปริมาณของ ZVI ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในการบำบัดในการทดลองแบบ batch experiment

Treatment	pH	pH following treatment of methyl orange									
	0 min	Time (min)									
		15	30	45	60	90	120	180	270	360	360
<i>PS slow-release experiment</i>											
Control (KCL)	6.70	7.48 (0.03)	7.03 (0.06)	7.12 (0.07)	6.92 (0.11)	7.12 (0.08)	7.10 (0.07)	7.08 (0.06)	6.93 (0.05)	6.54 (0.03)	6.11 (0.03)
MO + PS	6.70	3.55 (0.09)	3.42 (0.10)	3.34 (0.09)	3.30 (0.11)	3.26 (0.11)	3.21 (0.09)	3.16 (0.10)	3.09 (0.09)	3.03 (0.11)	2.83 (0.10)
MO + ZVI	6.70	5.92 (0.02)	5.98 (0.01)	6.09 (0.05)	5.76 (0.11)	5.97 (0.02)	5.94 (0.03)	5.89 (0.02)	5.96 (0.15)	5.80 (0.13)	5.77 (0.19)
MO + PS + ZVI	6.70	3.37 (0.05)	3.28 (0.09)	3.17 (0.08)	3.12 (0.03)	3.05 (0.01)	2.94 (0.03)	2.86 (0.05)	2.70 (0.02)	2.55 (0.05)	2.33 (0.04)

Note: Values in parenthesis are standard deviation.

4.4 การทดลองในถังจำลองการไหล

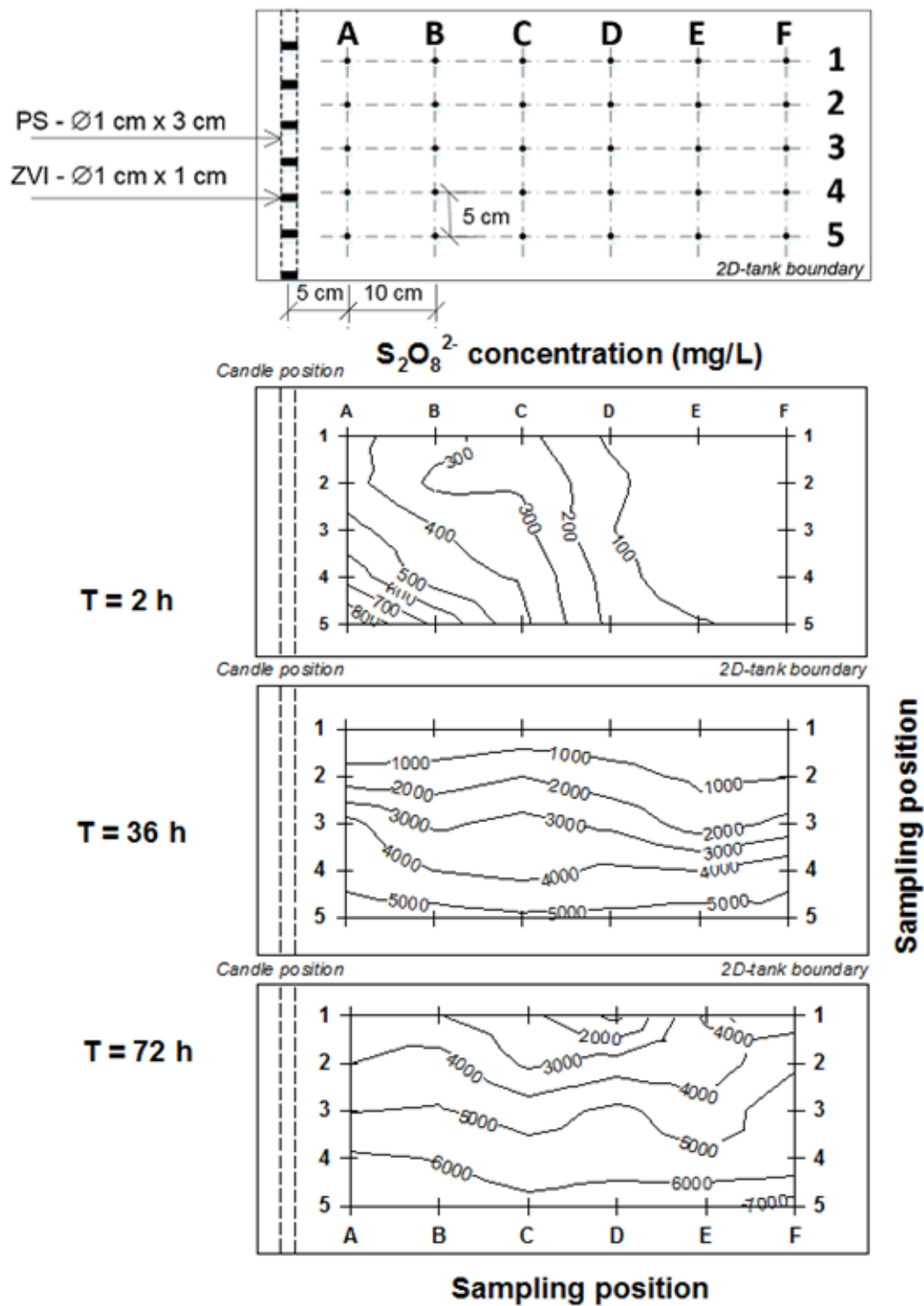
ในส่วนที่สองของการทดลองในงานวิจัยนี้เราได้ทำการศึกษาทดลองโดยใช้ถังแบบ 2 ทิศทาง เพื่อศึกษา 1) รูปแบบการปลดปล่อยเปอร์ซัลเฟตจากเทียนในถังแบบ 2 ทิศทาง และ 2) การกำจัดเมธิลออเรนจ์ในถังแบบ 2 ทิศทาง ผู้วิจัยได้มีการนำเทียนเปอร์ซัลเฟตและ ZVI นำมาเรียงต่อกันในแนวตั้งเพื่อที่จะจำลองในการสอดเทียนลงไปหลุมลงไปยัง aquifer เพื่อบำบัดเมธิลออเรนจ์ (รูปที่ 18) ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตจากจุดที่มีการเก็บตัวอย่าง (เช่นจากจุด A1 ถึง F5 รูปที่ 18) เป็นตัวแทนของ plume ของเปอร์ซัลเฟต ซึ่งความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่สังเกตจากถังสูงสุดคือที่ 8,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใน 2 ชั่วโมงแรก และความเข้มข้นลดลงอย่างช้าๆ เมื่อน้ำใหม่เข้ามาทดแทน ปริมาณที่ถูกปลดปล่อยออกมาสูงของเปอร์ซัลเฟตในช่วงแรกนั้นสอดคล้องกับการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตที่ทำการทดลองใน batch (รูปที่ 14B) ที่เวลา 72 ชั่วโมง ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเพิ่มจาก 2,000 เป็น 7,000 มิลลิกรัมต่อลิตรจากการทดลองในถังแบบ 2 ทิศทาง การกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตนั้นจะลงไปตามก้นของถังเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ดังนั้นเมธิลออเรนจ์ที่อยู่ใต้เทียนเปอร์ซัลเฟตจะถูกบำบัดก่อน

เพื่อศึกษาและติดตามรูปแบบการกำจัดเมธิลออเรนจ์ ผู้วิจัยได้ทำการอิมตัวถังแบบ 2 ทิศทางด้วยเมธิลออเรนจ์และทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีที่หายไปจากการทำปฏิกิริยาด้วยเทียนเปอร์ซัลเฟตและ ZVI หลังจากการเก็บตัวอย่างพบว่าที่ 2 ชั่วโมงเมธิลออเรนจ์ลดลงไปถึง 45% และที่ 24 ชั่วโมงลดลงไปถึง 75% ที่ด้านล่างของถังแบบ 2 ทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 19 ที่เวลา 36 ชั่วโมงสามารถกำจัดเมธิลออเรนจ์ไปได้มากกว่า 85% ยกเว้นด้านบนบนของถังที่สามารถกำจัดไปได้เพียง 70-80% ดังแสดงในรูปที่ 19 ซึ่งการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการกำจัดเมธิลออเรนจ์ไม่เป็นรูปแบบที่สามารถกำจัดได้ทุกส่วนของถังแบบ 2 ทิศทางเนื่องจากการไม่มีการใช้การกวนสารเหมือนที่ทำการทดลองใน batch

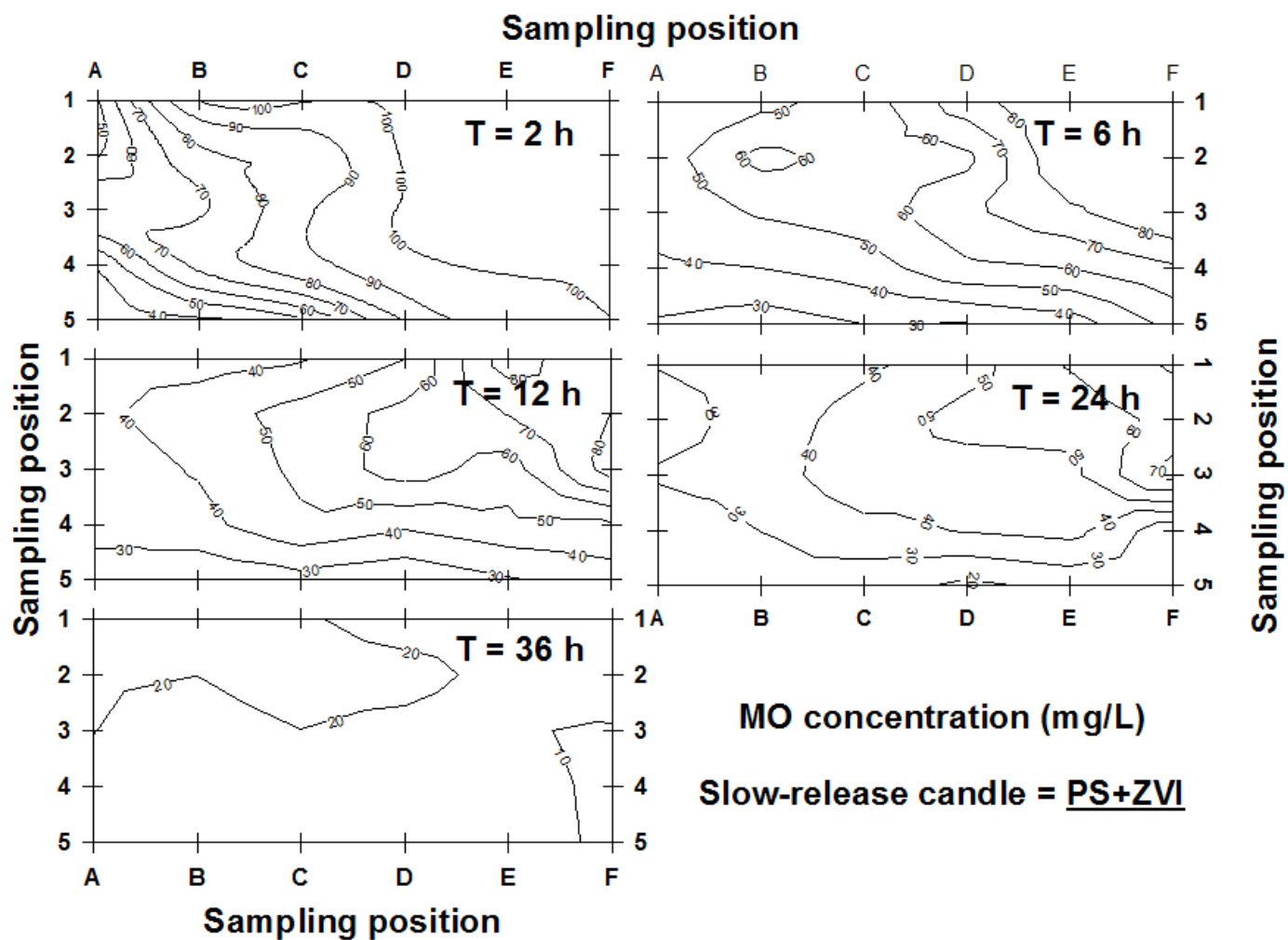
เพื่อศึกษาการกำจัดเมธิลออเรนจ์ทั้งหมดในภาพรวม ตัวอย่างน้ำไหลออกจากถังได้ถูกเก็บน้ำมาทดสอบจากจุดเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 12 ผู้ทำการวิจัยพบว่าสามารถพบร้อยละการกลับคืนเพียงร้อยละ 50 หลังจากทำการบำบัดไป 36 ชั่วโมง (ข้อมูลไม่ได้แสดง) ความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ที่ออกจากถังไปสูงกว่าที่เก็บจากจุดเก็บตัวอย่างรอบๆถัง แสดงให้เห็นว่าเมธิลออเรนจ์ไม่ได้ถูกกำจัด

อย่างสมบูรณ์จากเทียนที่อยู่ในถัง ซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดได้ยากในการกำจัดสารเคมีในถังที่มีขนาดสั้น (Lee และ Schwartz, 2007 a; Chokejaroenrat et al., 2013) ในขณะที่เมธิลออเรนจ์ถูกผลักออกไปแต่อนุมูลอิสระของซัลเฟตละลายกลับเข้ามาในสารละลายทำให้เกิดบริเวณการทำปฏิกิริยาระหว่างสารออกซิแดนต์และสารปนเปื้อนเพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพการใช้เทียนเปอร์ซัลเฟตร่วมกับ ZVI ในรูปแบบของการกระจายตัวอย่างช้าๆของสารออกซิแดนต์พบว่าการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพดีสามารถกำจัดเมธิลออเรนจ์ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นสามารถที่จะใช้เทียนเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดสารเคมีปนเปื้อนในบริเวณที่มีการปนเปื้อนได้

ในสภาวะการทดลองของเราประกอบด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที ในขณะที่การทดลองจากรายงานอื่นไม่ได้มีการใช้อัตราการไหล (Khambhu et al. 2012) นอกจากนั้น ในการทดลองของเราการไหลแบบ density-driven มีความสำคัญรองจากแรงแบบ advection ดังนั้นน้ำใต้ดินในธรรมชาติมีอัตราการไหลที่ช้ากว่าการทดลองในรายงานนี้ สารออกซิแดนต์อาจจะผ่านไปบริเวณที่มีการปนเปื้อนใน LPZ ในระหว่างการบำบัด เมื่อรูพรุนของบริเวณโดยรอบ LPZ ถูกบำบัด สารปนเปื้อนจะแพร่ออกจาก LPZ และจะปนเปื้อนในน้ำใต้ดินอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหา density-driven oxidant และเพื่อความมั่นใจในการเป็นรูปแบบเดียวกันของออกซิแดนต์เพื่อทำการบำบัดให้ทั่วบริเวณ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตควรจะมีค่าเข้มข้นที่สูงและถูกกระจายตัวออกมาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นด้วยเวลาที่เปลี่ยนไป เทียนเปอร์ซัลเฟตควรจะสามารถสร้างบริเวณในการกำจัดได้ในบริเวณกว้างในชั้นของน้ำใต้ดิน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของ ZVI ที่ไปเร่งปฏิกิริยาของเปอร์ซัลเฟตสามารถที่จะไปบำบัดสารปนเปื้อนอินทรีย์อื่นได้ขึ้นกับการแข่งขันทางจลนศาสตร์ระหว่างสารปนเปื้อนและสารที่สามารถบำบัดได้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดของเทียนเปอร์ซัลเฟตร่วมกับ ZVI ในน้ำใต้ดิน จำเป็นต้องมีการปรับความเหมาะสมระหว่างสภาวะของสภาพแวดล้อม น้ำใต้ดินของพื้นที่เป้าหมายก่อนการดำเนินการจริงในภาคสนาม



รูปที่ 18 แสดงการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตจากเทียนเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ร่วมกับ ZVI ในถังแบบ 2 มิติ
ที่เวลา 2 6 12 24 และ 36 ชั่วโมง



รูปที่ 19 แสดงการความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกบำบัดด้วยเทียนเปอร์ซัลเฟต
ที่ใช้ร่วมกับ ZVI ที่เวลา 2 6 12 24 และ 36 ชั่วโมง