

出國報告（出國類別：國際研討會）

出席「2016 先進功能性材料國際會議(AFM 2016)」心得報告

服務機關：國防大學理工學院化學及材料工程學系

姓名職稱：文職教授 汪成斌

派赴國家：韓國

出國期間：105 年 8 月 9 日至 8 月 12 日

報告日期：105 年 8 月 22 日

摘要

2016 先進功能性材料國際會議 (AFM 2016) 是由韓國濟州大學和 AFM 學會共同主辦，於 2016 年 8 月 8 - 11 在濟州島國際會議中心 (ICC) 舉行，為先進材料及綠色工程領域重要的國際會議之一。會議共舉行四天，每天行程滿檔 (09:00 至 17:00)，計有大會專題演講 (共 2 位)，各相關主題(多功能複合材料、先進薄膜材料、聚合物及陶瓷材料、能源儲存及轉化裝置、綠色及化學工程、生物感測器及生物材料、先進催化材料、低維奈米材料等)之邀請講座 (共 8 位)，另提供口頭和壁報論文之發表。吸引了超過 800 名來自世界各地的學者，包括德國、美國、加拿大、丹麥、法國、澳大利亞、印尼、印度、沙烏地阿拉伯、捷克、美國、英國、義大利、比利時、羅馬尼亞、奈及利亞、伊朗、新加坡、馬來西亞、菲律賓、香港、泰國、韓國、日本、中國、台灣等，此研討會投稿論文分口頭報告 (共 310 篇) 及壁報展示 (共 230 篇)，共計 540 餘篇。在會議中聆聽各國學者之學術演講，並於茶敘交流時間彼此交換意見並討論相關問題。本次會議提供一個相當好的知識交流平台，各國學者齊聚一堂研討各種先進材料領域最新之進展和技術信息，並傳達新的研究領域和國際未來發展方向及其優先次序。此外藉由參與大會各國專家學者之交換研究心得及吸取他人寶貴之研究經驗，將可做為本實驗室日後研究之參考。

筆者感謝科技部之補助成行，計發表一篇口頭報告論文：“Abatement of Phenolic Compounds by Microwave-Enhanced Catalytic Degradation Method over High Valenced Nickel Oxide”，達到與各國學者切磋交流的機會，真是獲益匪淺。

目次

頁碼

壹、 會議目的	4
貳、 會議過程	4
參、 會議心得	7
肆、 建議事項	8

壹、 會議目的

2016 先進功能性材料國際會議（AFM 2016）是由韓國濟州大學和 AFM 學會共同主辦，於 2016 年 8 月 8 - 11 在濟州島國際會議中心（ICC）舉行，為一跨學科國際會議。本次會議提供一個相當好的知識交流平台，各國學者齊聚一堂研討各種先進材料領域最新之進展和技術信息，並傳達新的研究領域和國際未來發展方向及其優先次序。其會議宗旨在於藉由學術的發展與腦力激盪，借鑒實證研究和概念的見解，達到共享交流。依專長領域進行一系列學術研究成果發表及新知討論，以便交流最新進展和技術信息，歷年來所主辦之相關學術研討會及專題討論會，皆對該學術領域有深遠的影響及貢獻。因此，藉由此學術交流進而瞭解國際未來研究發展方向及趨勢，並與各國專家學者交換研究心得及吸取他人寶貴研究經驗，將可做為日後研究之參考。

貳、 會議過程

本會議屬於一大型國際研討會，於2016年8月8 - 11日在濟州島國際會議中心舉行，參加人員超過800員，分別來自世界各國之學術單位、民間機構、專家學者及研究人員參與為期四天之學術論文發表討論會。大會所討論之範圍很廣，包含多功能複合材料、先進薄膜材料、聚合物及陶瓷材料、能源儲存及轉化裝置、綠色及化學工程、生物感測器及生物材料、先進催化材料、低維奈米材料等，與會者多為各國在該領域學有專精之工程師、技術員、教授、研究生與學者，本次台灣參與之人員多達三、四十餘位教授及研究生（包含東華、台大、文化、台北技術大學、明志、元智、中央、清大、中原、中正、中山、逢甲、彰師大、暨南、成大、台灣海洋大學及國防大學等）。於研討會期間與各學者相互密切交流之下獲益良多。濟州島為一觀光勝地，正逢暑假期間，出團的旅客非常多，直飛班機有限且未每天都有班機，因此在訂機票非常不順，僅訂到8月9日早上之班機。原本安排之口頭報告為8月8日，經與大會秘書處協調後，調整至9日下午，始能順利發表論文。除第一天的議程無法參加，後面三天與會期間過程十分順利，由於每天議程都有不同主題分別在不同的場地同時進行，因而無法全面顧及，謹將本人出席參與的部分簡要介紹如下。

8月9日（大會第二天）

濟州島交通（僅巴士公車及計程車）較不方便，當天飛抵濟州機場再轉搭巴士，於中午抵達國際會議中心報到，簡單用過餐正好趕上大會安排的專題演講：「Surface Engineered High-performance Catalysis」是由Xinhe Bao教授主講，貴金屬在異相催化上具有高活性及化學穩定性，唯受限於昂貴而無法大量使用，如何控制並提升使用效率，以改進其催化活性及使用壽命在工業應用上是一挑戰。奈米觸媒之組成、原子配位結構及最表層之張力是決定催化反應性能之關鍵，Bao教授即利用表面修飾工程將觸媒材料的表面結構稍作修改，即可提升允許表面吸附之位置，或是藉修飾而得到均勻且含量多的特定缺陷，二者均可大大改進催化活性及穩定性。Bao教授藉由先進儀器之鑑定，能掌控貴金屬觸媒之表面組成及其結構，並對催化效能及其應用做一詳盡的報導，獲得熱烈迴響。奈米觸媒材料是眾多種類的奈米材料之一，可以用來吸附或分離分子，且因具有高表面積而能應用在生醫、能源、分離程序、材料等領域，已廣泛應用在生活中，在未來的應用中它會繼續大放異彩。在分項演講中印象最深刻的是Pinit Kidkhunthod學者的論文「Structure Investigation of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x(\text{Na}, \text{K}, \text{Ba})\text{MnO}_3$ Nanoparticles by X-ray Absorption Spectroscopy (XAS) Technique」發表，藉由貴重儀器對系列材料之結構做一詳盡探討，評估其應用於敏化太陽能電池之效能，獲得在座學者熱烈的迴響並提出不同觀點，Pinit Kidkhunthod學者均有條理的解說，是一位傑出的青年研究學者。我們設計類似的 $\text{La}_{1-x-y}\text{Ce}_x\text{Ca}_y\text{NiO}_3$ 觸媒，應用於乙醇蒸氣重組產氫上，對於抗積碳能力有突出表現，觸媒可持續維持一週的活性。趁中場休息時間請教Pinit Kidkhunthod學者，建議我們可以改變金屬先驅物、調控組成及溶劑，回國後將依建議嚐試。接著是實驗室呈現成果的重頭戲，由我口頭報告論文「Abatement of Phenolic Compounds by Microwave-Enhanced Catalytic Degradation Method over High Valenced Nickel Oxide」，由於前一位學者未出席報告，我有足夠的時間（每人15分鐘，主持人給我30分鐘）詳盡報告，吸引了許多學者提問及建議，綜整各學者提供之建議如下：未明確提出催化活性點為何？因受限於分析工具，無法具體提出有力的證據，擬重新設計新實驗，並藉助科技部貴儀（EPMA及AES）進一步證實；經微波輔助製得之 NiO_x 觸媒材料有顯著的能力，原因為何？初步定性及定量分析的證據已充足，唯欠缺

更精確貴重儀器之定量分析數據，擬藉助科技部貴儀（XPS/ESCA）進一步分析；三個NiO_x觸媒材料（PO、POM、PMO）對不同苯酚類化合物降解活性之差異性須詳加探討，這正是我們面對的難題，實驗結果很漂亮，唯手邊資料確實無法解釋其差異性，希望能藉助科技部貴儀（XPS/ESCA及HR-TEM）漸進求證。感謝各學者所提建言，回饋了我們許多思考空間，回國後有好多實驗要重新設計並安排進行，因所需工具均為需預約的貴重儀器，半年內能將所有數據蒐整、分析就不錯了，又羨慕起九州大學石原教授所掌握的資源一概不缺，可完全掌握所有的分析工具。

8月10日（大會第三天）

大會第三天安排了一場相當精采的大會專題演講：「From Nobel Prize Winning LEDs to Next Generation Laser Lighting: Solid State Lighting at UC Santa Barbara」是由美國的Tal MargaLith教授主講，Tal MargaLith教授從2014年諾貝爾物理獎--照亮世界的嶄新光芒談起，由三位日籍科學家赤崎永（Isamu Akasaki）、天野浩（Hiroshi Amano）、中村修二（Shuji Nakamura）發明節能、環保、有效率的藍色發光二極體（LEDs），催生明亮而節省能源的白色光源。使用LEDs就能用全新的方式製造白光，而LED燈的問世，使世人現在有比舊的燈具更加節能的選擇。白色LED燈發散出的亮白光線既持久又節能，為追求更加節能，讓每單位輸入電能所達到的光通量愈來愈高，現今還在持續不斷地改良，如下世代的固態雷射照明。關於一顆LED燈的最新記錄是每瓦300流明（lm/W），相較之下，一般白熾燈泡只有每瓦16流明，日光燈管頂多每瓦70流明。全世界的用電量中有四分之一用於照明，LED燈的貢獻就是大大節省世界的能源，因為每盞LED燈可以使用約10萬個小時，白熾燈為1千個小時，螢光燈則為1萬個小時，因此使用LED燈能讓物料的耗損顯著的縮小。此外，LED燈的發明給全球15億的人類帶來光明的願景，因為許多貧窮地區電力資源缺乏，但LED燈只需要一點點便宜的太陽能發電就可以亮起來，造福世界的每一份子。在分項演講中印象最深刻的是南京大學Qiang Wu教授的論文「Synthesis and Application of Messtructured Materials for Energy Storage and Conversion」發表，由於超級電容材料之開發是目前很熱門的研究主題，在座的學者提出了許多不同的論點與質疑，Qiang Wu教授均能詳細的解釋，具有大師風範。本實驗室並未從事超級電容及電池

之相關研究，唯有合成系列中孔碳材應用於儲氫材料之開發；海綿石墨烯之製備及應用於油污、染劑及有機溶劑之移除，效能上仍有改進的空間。趁中場休息請教Qiang Wu教授如何改善系列碳材之性能，建議我們在製備觸媒時可以改變碳材先驅物並控制溫度、溶液pH值之調整、模板劑成分、另亦可嘗試以微波/超音波系統輔助及冷凍乾燥法處理樣品，回國後將依其建議修正碳材之製備。

8月11日（大會第四天）

濟州島國際會議中心佔地非常廣，有好幾個大、中、小型會議廳，共可容納將近4000人，這次大會使用了一個大型會議廳及五個中、小型會議廳。整個會議中心還包含住宿、餐廳及購物商城，且臨海面山是不錯的開會、度假勝地，唯會議期間天氣炎熱是令人美中不足之處。第四天在分項演講中印象最深刻的是泰國Sukon Phanichphant教授的論文「Palladium-Loaded WO_3 Nanoparticles by Precipitation/Impregnation Methods for Ethanol Gas Sensors」發表，介紹新研發之氣體感測材料對於偵測乙醇蒸氣具有極高的選擇性，在 350°C 下，2000 - 15000 ppm之 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 可於3.8 s偵測到訊號。目前本實驗室係以乙醇為反應物，進行蒸氣重組產氫之研究，並未從事氣體之感測，Sukon Phanichphant教授的研究成果可作為我們日後在檢測反應系統是否有乙醇蒸氣逸出之疑慮，這在製程放大安全考量上是不可忽略的一環。趁中場休息時間請教Sukon Phanichphant教授有關感測材料之製備及鑑定，建議我們可以參考他發表之相關文章自製感測材料，針對乙醇蒸氣作感測。

參、 會議心得

本研討會為一跨學科國際會議，主題涵蓋多功能複合材料、先進薄膜材料、聚合物及陶瓷材料、能源儲存及轉化裝置、綠色及化學工程、生物感測器及生物材料、先進催化材料、低維奈米材料等的工程師、技術員、教授、研究生與學者，就專長領域進行一系列學術研究成果發表及新知討論。會議是由韓國濟州大學和AFM學會共同主辦的學術會議，為一重要之研討會。參加人員為世界各國之專家學者，此研討會投稿論文分口頭報告及壁報展示，共計540餘篇。大會所討論之範圍很廣，包含能源、環境工程、綠色工程、環境催化、先進多功能

材料等，且相關論述主題亦十分具參考價值。

本人參與會議並有一篇口頭報告論文發表，透過各國學者不同領域的經驗，於問答間各取所需，達到知識精進功效，並積極與各國學者交換演講意見達到學術交流目的。經過此次研討會歷練，使本人對未來之研究更具信心，將持續於此領域探討研析，並且對於後續之研究將會秉持精益求精的精神戮力完成。本次會議提供一個相當好的知識交流平台，藉由此學術交流進而瞭解國際未來研究發展方向及趨勢，真是獲益匪淺。

肆、 建議事項

2016 先進功能性材料國際會議（AFM 2016）於 2016 年 8 月 8 - 11 在濟州島國際會議中心（ICC）舉行，為一跨學科國際會議，因領域涵蓋範圍較廣，吸引與會者包含電機/電子、物理、化學、環工、化工及工程學科、機電及能源學科各領域學有專精之工程師、技術員、教授、研究生與學者，為一大型國際會議，探討範圍包含能源、環境工程、綠色工程、環境催化、先進多功能材料等，值得相關研究人員與學者參與。這次研討會台灣參與之人員算多，唯大陸參與之學者更多，顯示大陸政府非常鼓勵學者參加國際研討會，並積極爭辦大型之國際研討會。出席國際學術會議情況是大學辦學績效評估中非常重要的指標參考依據，各校應積極鼓勵研究生及老師踴躍出席國際學術會議，以展現大家研究成果之決策應該持續推動。本人參加這次會議，發現除主辦國，中國大陸、泰國、印度、日本等國家之出席人數均高出我們許多，鄰近國家重視全方位科學研究與發展之務實態度值得借鏡。個人認為學校鼓勵作法仍可加強，譬如提供更多的經費補助，以鼓勵並增加國內專家學者參與機會，藉以吸收國際新知並分享研究成果，相信對國內各方面研究及學術工作的提昇，必定有所助益。願以此次的與會心得與大家分享，本次研討會攜回會議論文冊乙本及乙片會議所有投稿摘要電子檔。

作者發表之論文

Abatement of Phenolic Compounds by Microwave-Enhanced Catalytic Degradation Method over High Valenced Nickel Oxide





Abatement of Phenolic Compounds by Microwave-Enhanced Catalytic Degradation Method over High Valenced Nickel Oxide

Chen-Bin Wang

National Defense University, Taiwan

08/09/2016 in Jeju, S. Korea (AFM-2016)

Phenolic Pollutants

- 1. Petrochemical 、 chemical and pharmaceutical industries.**
- 2. Non-biodegradation.**
- 3. Chemical carcinogenesis 、 gene mutation and bioaccumulation.**
- 4. It has been listed as the priority pollutant in the list of USEPA.**

Degradation of Phenolic Pollutants

Method	Catalyst	Oxidizing agent	Advantage	Disadvantage
Photocatalytic degradation	TiO ₂	air	T	t, [m], E
Catalytic wet air oxidation	Mo _x	air	[m]	t, T, P, E
Ultrasonic degradation	--	air, O ₃ or H ₂ O ₂	T, P,	t, [m], E
Fenton oxidation	Fe ²⁺	H ₂ O ₂	T, P, E	[m], Fe ²⁺
Electrochemical oxidation	--	free radical	T, P, [m],	E

T: temperature **P: pressure** **E: energy**
t: time **[m]: concentration**

3

Pollutant	Method	Catalyst	Activity	Author
phenol	Catalytic oxidation	CoO _x /FeO _x	8 min, 85 %, 200 ppm	Christoskova et. al.
phenol	Catalytic oxidation	NiO _x	30 min, 100%, 200 ppm	Christoskova et. al.
phenol	Photocatalytic oxidation	TiO ₂	6 h, 88 %, 50 ppm	Tryba et. al.
Phenol	Ultrasonic oxidation	O ₃	120 min, 97 %, 115 ppm	Mahamuni et. al.
phenol	Wet air oxidation	Fe/AC	0.5 h, 95 %, 1000 ppm	Quintanilla et. al.
2-chlorophenol	Photo-Fenton degradation	[Fe ²⁺] 70 ppm [H ₂ O ₂] 700 ppm	15 min, 96.4 %, 124 ppm	Moya et. al.
2-chlorophenol	Ozonation	[O ₃] 12.3 ppm	60 min, 100 %, 97 ppm	Sung et. al.
2-chlorophenol	Photocatalytic oxidation	Co-TiO ₂	180 min, 100 %, 12.5 ppm	Barakat et. al.
3-chlorophenol	Ultrasonic oxidation	air	9 h, 90 %, 10 ppm	Serpone et. al.
3-chlorophenol	UV-assisted degradation	TiO ₂ /AC	2 h, 100 %, 40 ppm	El-Sheikh et. al.
4-chlorophenol	Photocatalytic oxidation	Pt/TiO ₂	60 min, 100 %, 1 ppm	Hügül et. al.
4-chlorophenol	Microwave-enhanced AOP	AOP	60 min, 100 %, 30 ppm	Horikoshi et. al.
4-chlorophenol	Catalytic oxidation	NiO _x	20 min, 100%, 200 ppm	Christoskova et. al.
4-chlorophenol	Photochemical electron-transfer processes	TiO ₂ /CdS	4 h, 90 %, 26 ppm	Horikoshi et. al.
4-chlorophenol	Photocatalytic oxidation	TiO ₂	90 min, 100 %, 64 ppm	Moonsiri et. al.
4-nitrophenol	Photocatalytic oxidation	TiO ₂	150 min, 50 %, 14 ppm	San et. al.
4-nitrophenol	Microwave-assisted photocatalytic degradation	TiO ₂	120 min, 100 %, 30 ppm	Ai et. al.
4-nitrophenol	Electro-Fenton degradation	Fe ²⁺	120 min, 100 %, 28 ppm	Yuan et. al.

Motivation and Purpose of Research

Motivation

Abatement of phenolic compounds

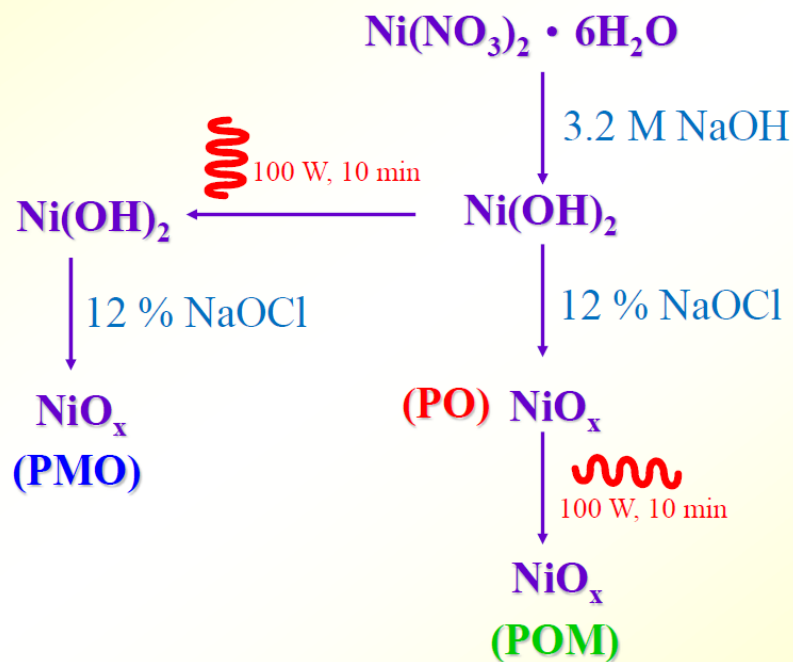
Purpose

MECD (Microwave-Enhanced Catalysis Degradation) method is being substituted for the conventional methods.

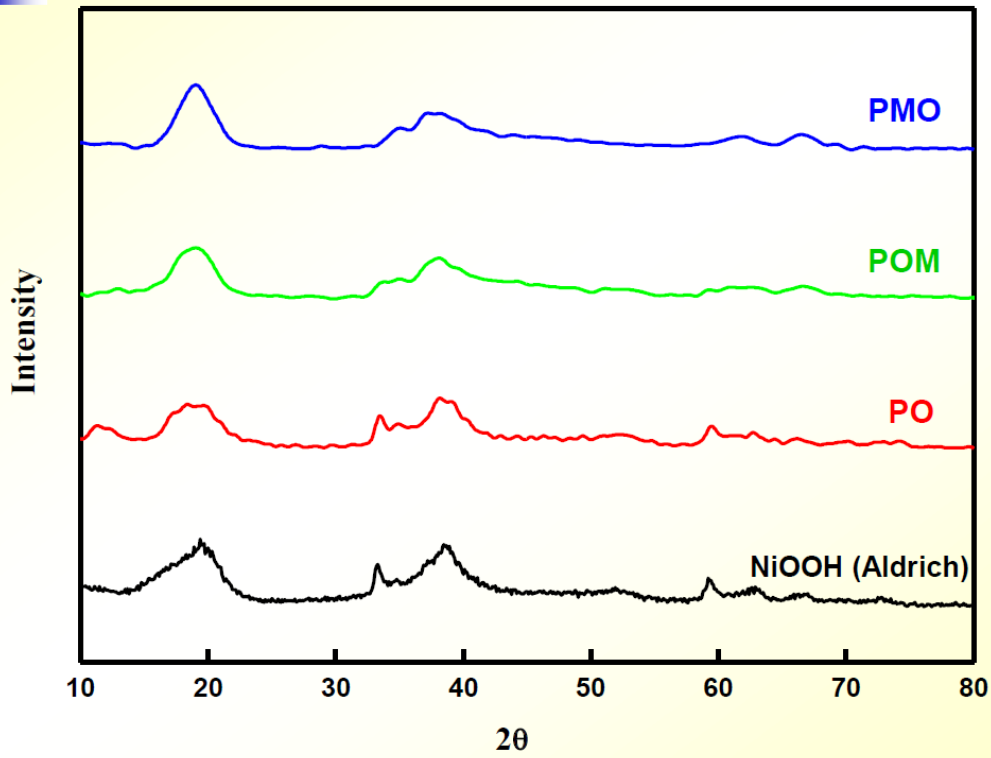
Low temperature to degrade the phenolic compounds.

Large scale development of a MECD by optimal experimental design.

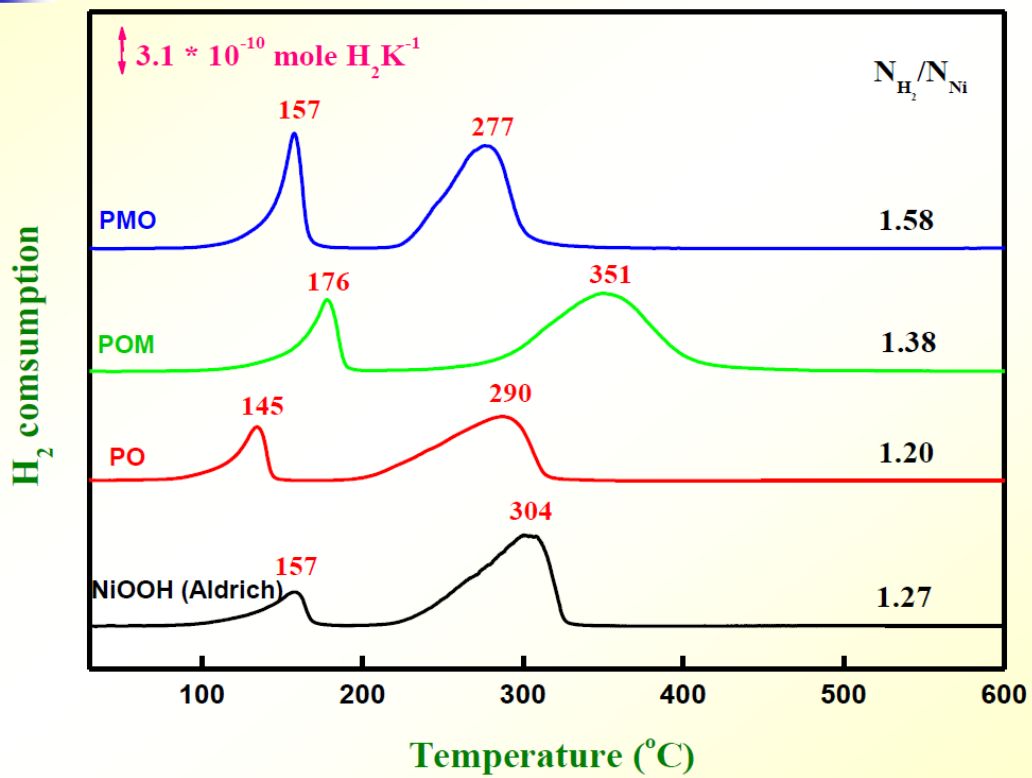
Microwave-assisted Preparation of NiO_x



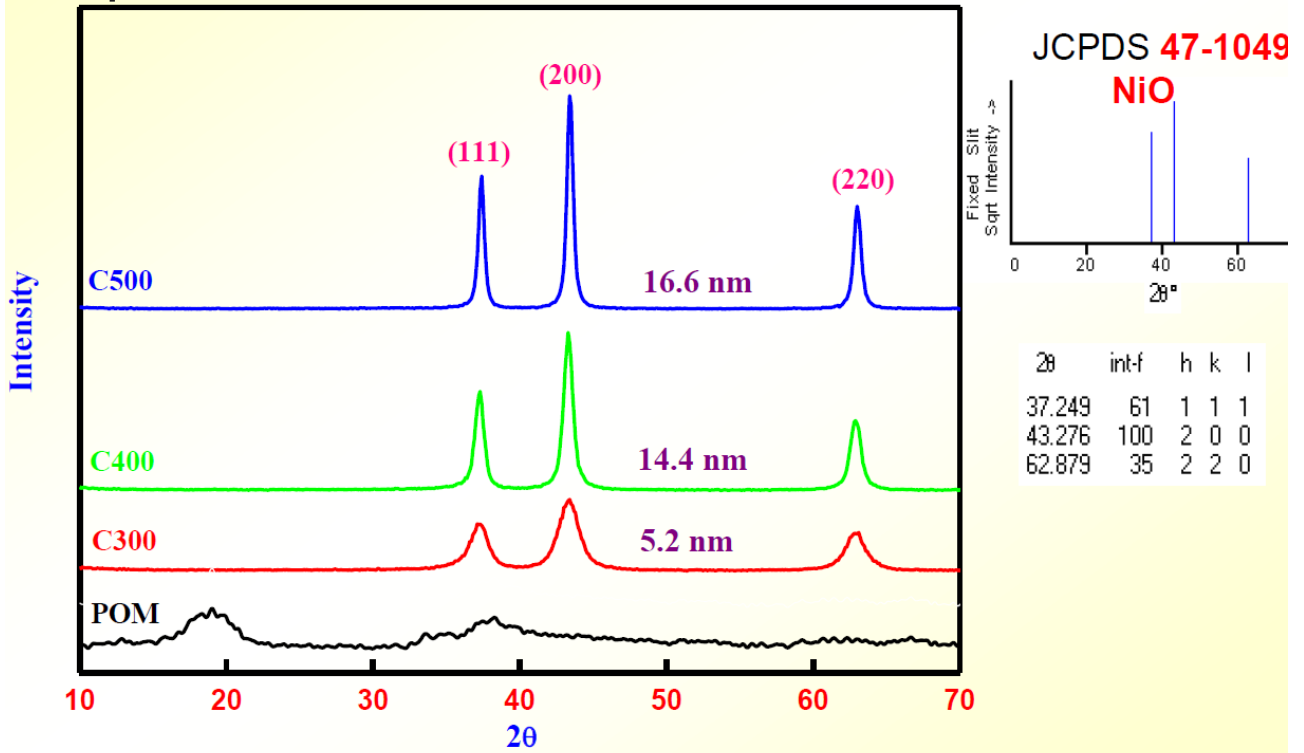
XRD Characterization



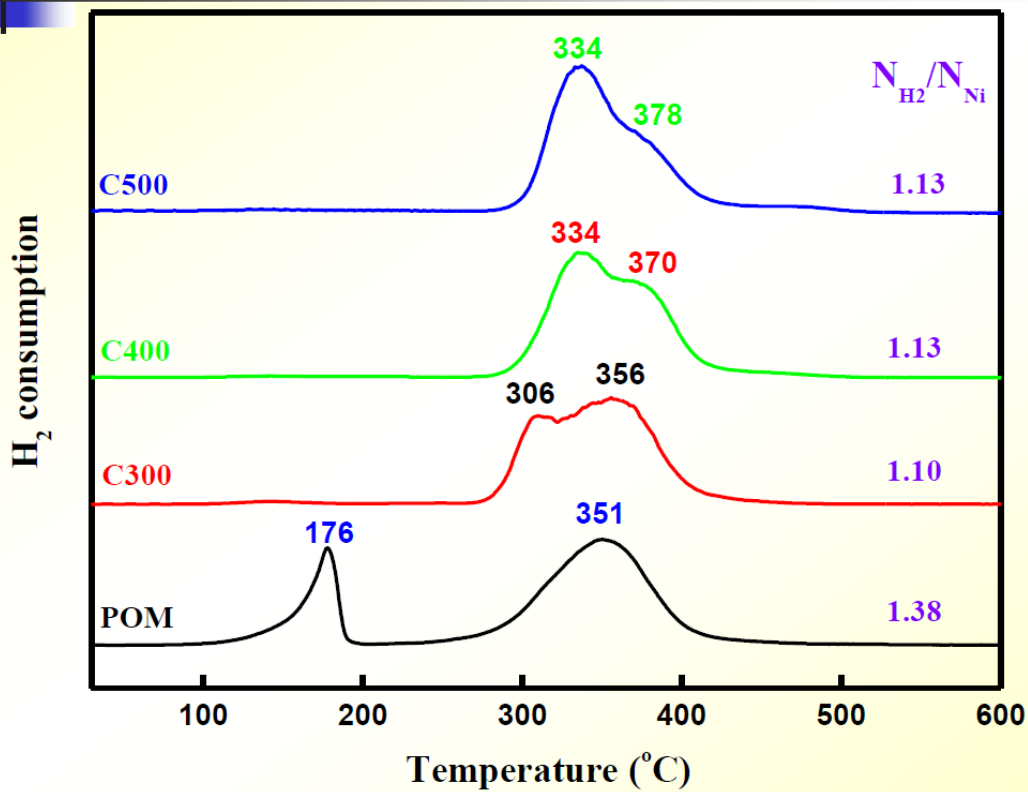
TPR Characterization



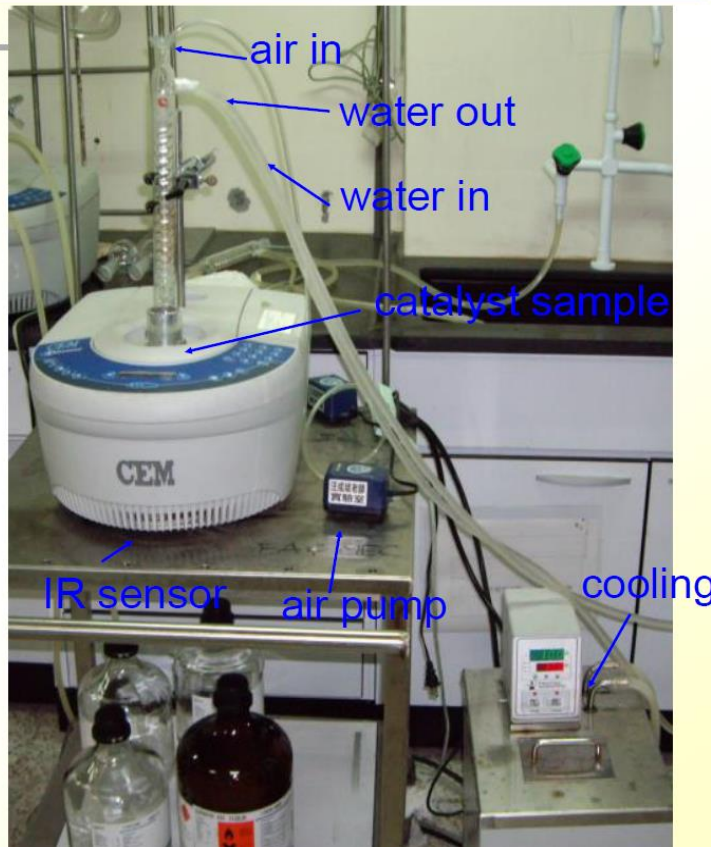
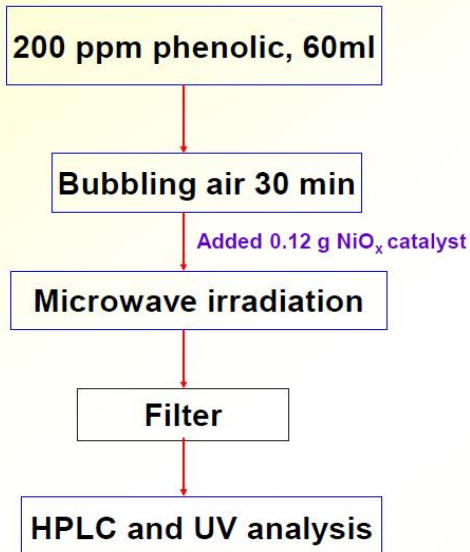
XRD Characterization



TPR Characterization



Microwave-Enhanced Catalysis Degradation (MECD) System



Phenol (200 ppm) $\xrightarrow[\text{pH} = 4, 40^\circ\text{C, variation of NiO}_x]{\text{MECD}}$

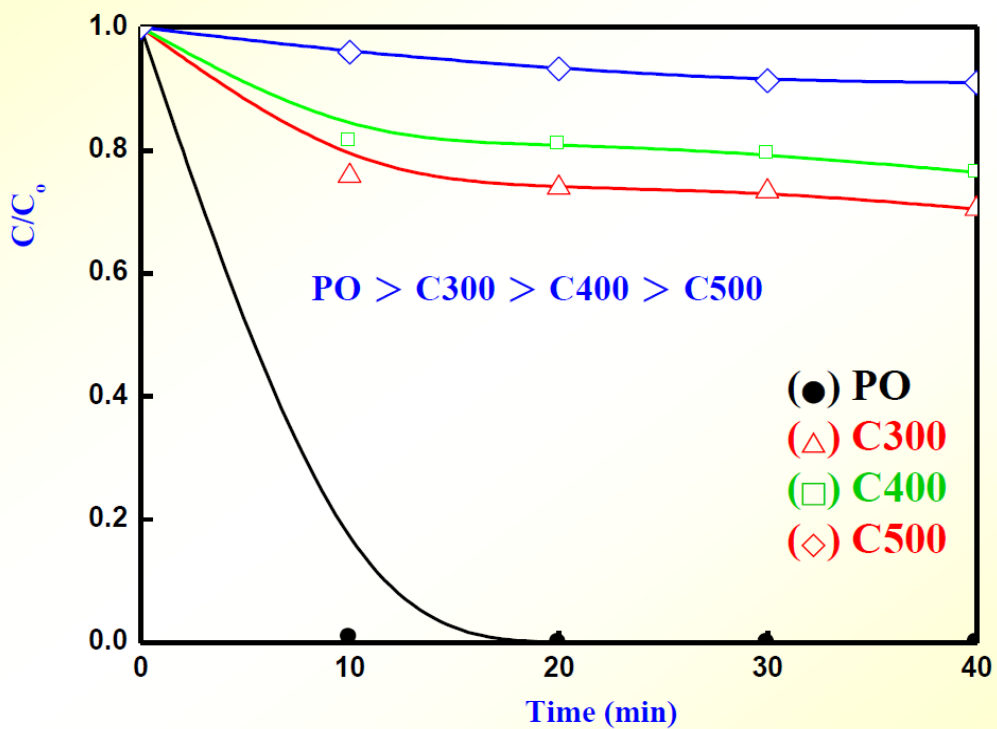


Table 1 Catalyst characterization and rate constants of the phenol degradation over nickel oxides at 40°C

Catalyst	XRD		S_{BET} m ² /g	TPR		Degradation of phenol	
	Structure	d (nm)		T_{red} (°C)	N_{H_2}/N_{Ni}	α_{20}^* (%)	k (min ⁻¹)
PO	Hexagonal	1.8	201	145, 290	1.20	100	0.646
C300	cubic	3.5	104	280	0.94	26.3	0.007
C400	cubic	7.7	52	290	0.95	18.9	0.006
C500	cubic	15.0	27	295	0.99	6.7	0.003

* Degree of phenol conversion is determined at 20 minute.

2-CP (200 ppm)

MECD

pH = 4, 40 °C, variation of NiO_x

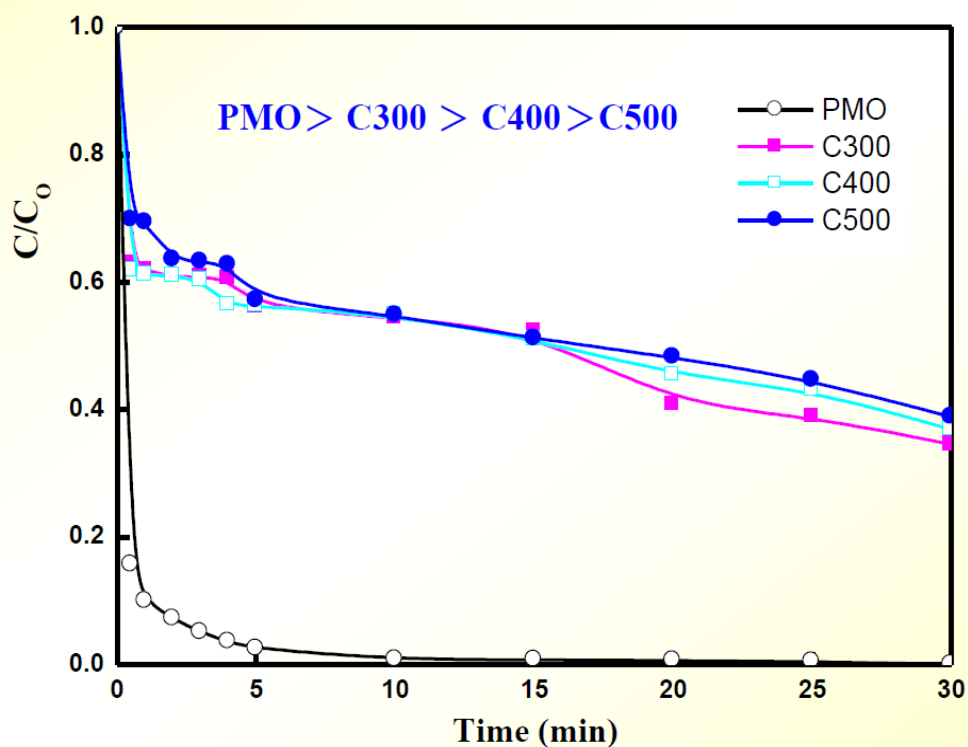


Table 2 Catalyst characterization and rate constants of the 2-chlorophenol degradation over nickel oxides at 40°C

Catalyst	XRD		S_{BET} m ² /g	TPR		Degradation of 2-CP	
	Structure	d (nm)		T_{red} (°C)	N_{H_2} / N_{Ni}	α_{20}^* (%)	k (min ⁻¹)
PMO	Hexagonal	2.1	156	157, 277	1.58	100	0.385
C300	cubic	4.1	135	361	1.09	59	0.020
C400	cubic	9.4	117	385	1.11	54	0.015
C500	cubic	12.0	59	391	1.11	51	0.014

* Degree of 2-chlorophenol conversion is determined at 20 minute.

3-CP (200 ppm) $\xrightarrow[\text{pH} = 4, 40^\circ\text{C}, \text{variation of NiO}_x]{\text{MECD}}$

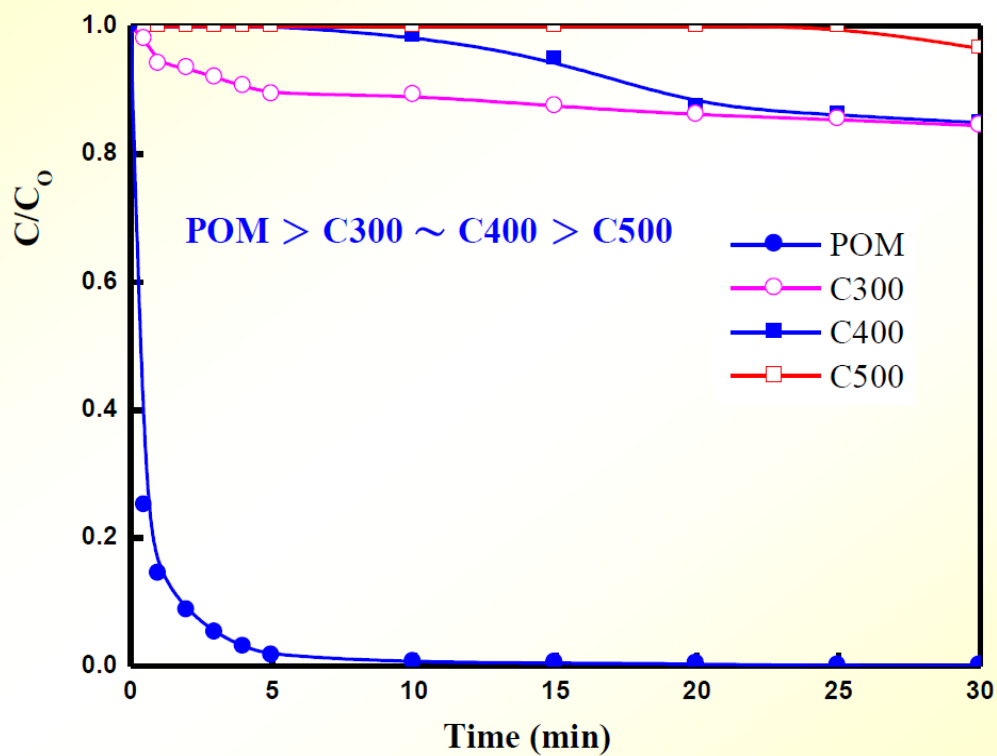


Table 3 Catalyst characterization and rate constants of the 3-chlorophenol degradation over nickel oxides at 40°C

Catalyst	XRD		S_{BET} m ² /g	TPR		Degradation of 3-CP	
	Structure	d (nm)		T_{red} (°C)	N_{H_2}/N_{Ni}	α_{15}^+ (%)	k (min ⁻¹)
POM	Hexagonal	2.2	211	176, 351	1.38	100	0.273
C300	cubic	5.2	139	306, 356	1.10	12	0.006
C400	cubic	14.4	89	334, 370	1.13	5	0.003
C500	cubic	16.6	33	334, 378	1.13	0	0

* Degree of 3-chlorophenol conversion is determined at 15 minute.

4-CP (200 ppm) $\xrightarrow[\text{pH} = 4, 40^\circ\text{C}, \text{variation of NiO}_x]{\text{MECD}}$

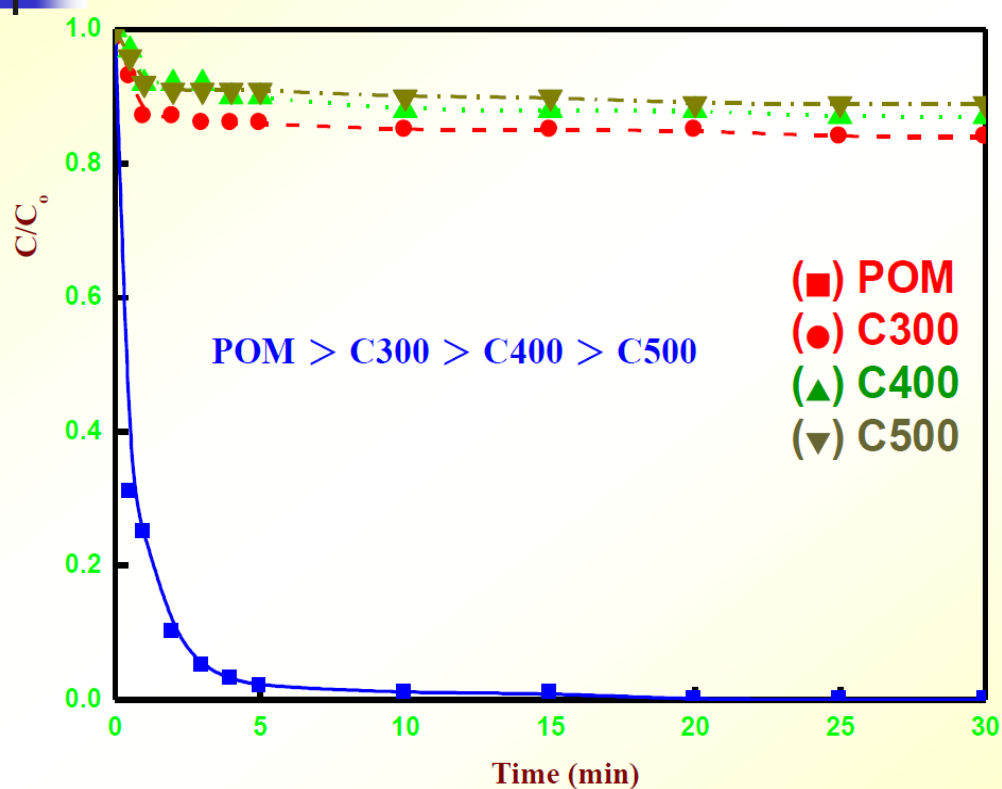
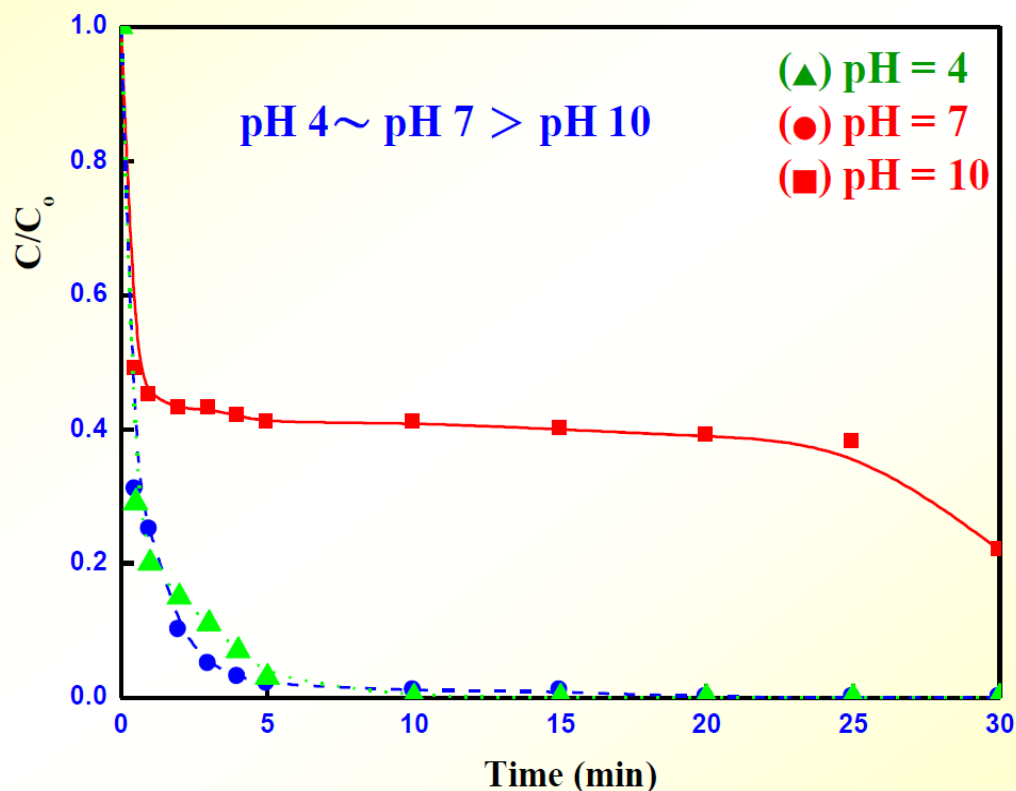


Table 4 Catalyst characterization and rate constants of the 4-chlorophenol degradation over nickel oxides at 40°C

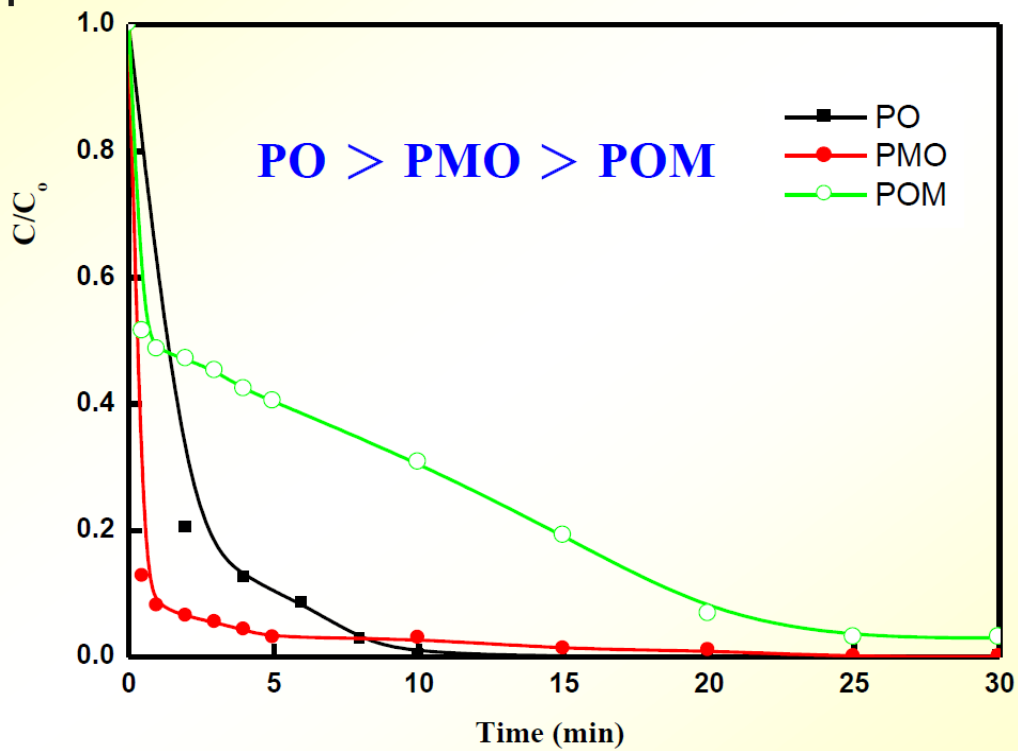
Catalyst	XRD		S_{BET} m ² /g	TPR		Degradation of 4-CP	
	Structure	d (nm)		T_{red} (°C)	N_{H_2}/N_{Ni}	α_5^+ (%)	k (min ⁻¹)
POM	Hexagonal	2.2	211	176, 351	1.38	100	0.146
C300	cubic	5.2	139	306, 356	1.10	16	0.003
C400	cubic	14.4	89	334, 370	1.13	13	0.002
C500	cubic	16.6	33	334, 378	1.13	11	0.002

* Degree of 4-chlorophenol conversion is determined at 5 minute.

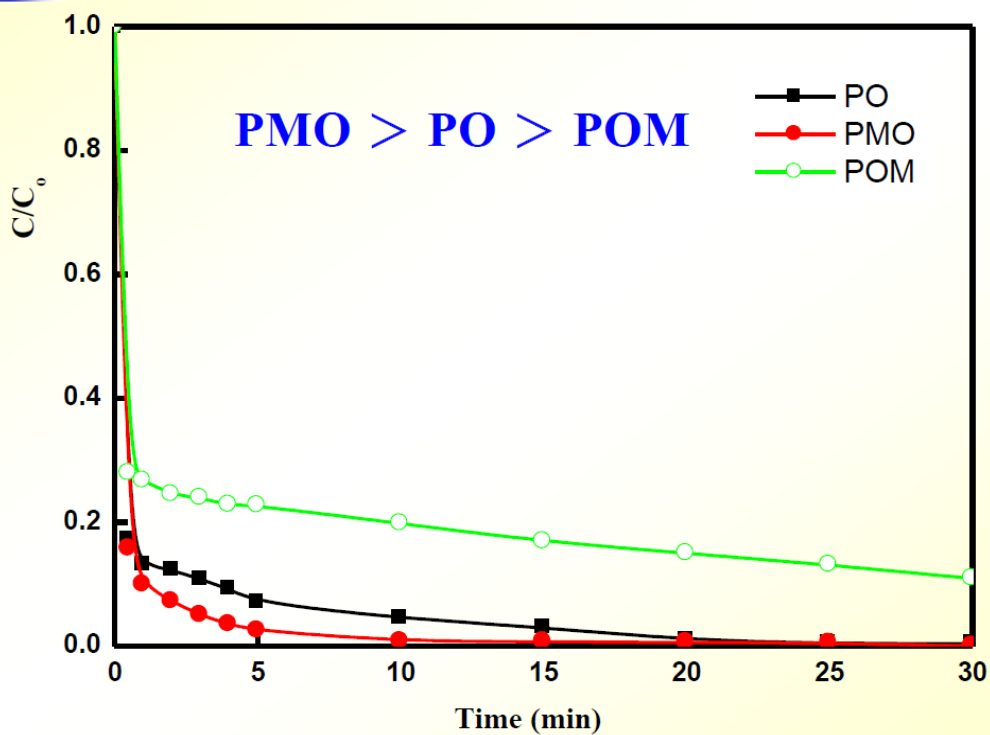
4-CP (200 ppm) ———— MECD/POM catalyst
40 °C, variation of pH



Phenol (200 ppm) $\xrightarrow{\text{MECD}}$
pH = 4, 40 °C, variation of NiO_x



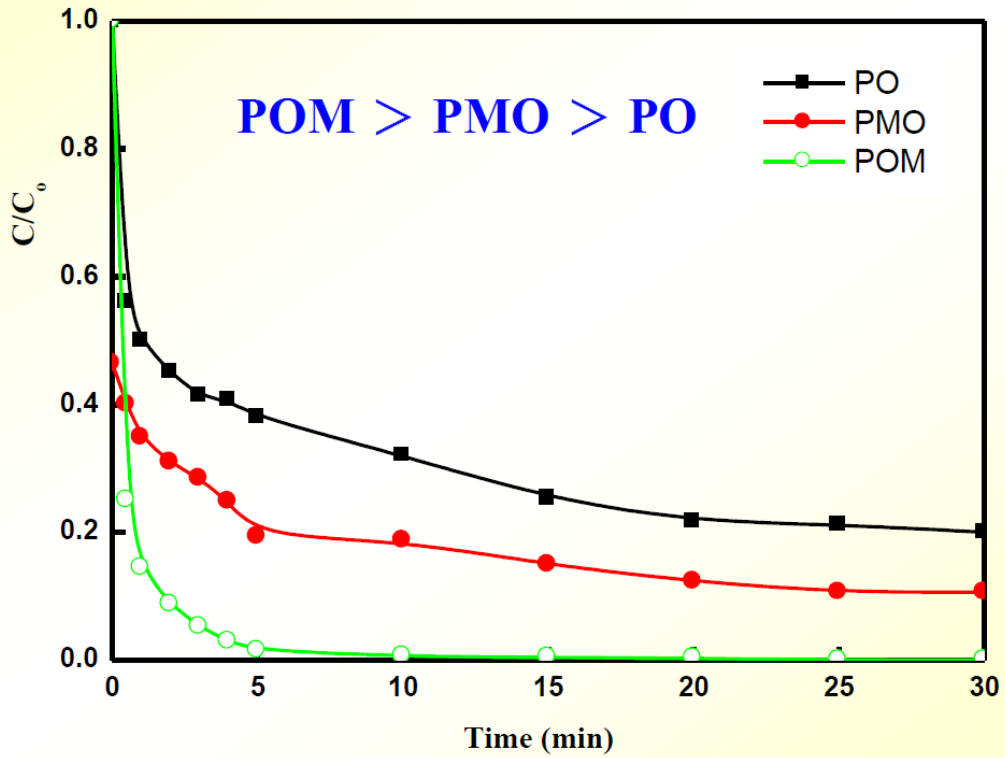
2-CP (200 ppm) $\xrightarrow{\text{MECD}}$
pH = 4, 40 °C, variation of NiO_x



3-CP (200 ppm)

MECD

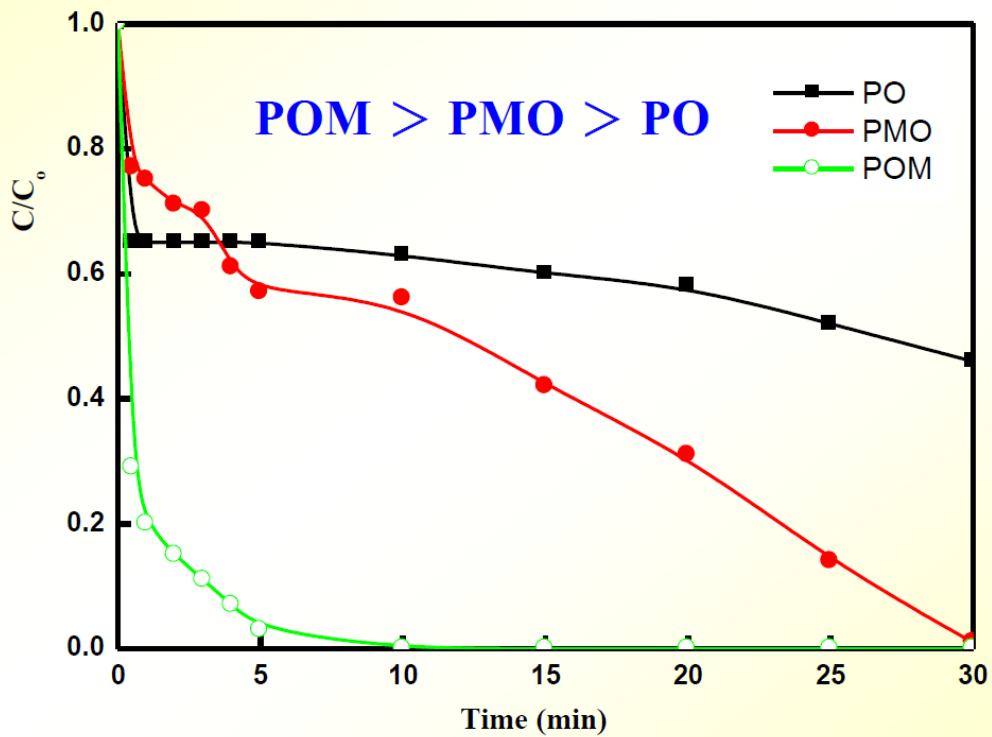
pH = 4, 40 °C, variation of NiO_x



4-CP (200 ppm)

MECD

pH = 4, 40 °C, variation of NiO_x



CP (200 ppm)

MECD

pH = 4, 40 °C, variation of NiO_x

2CP > 3CP > 4CP

The higher the pK_a of the chlorophenols,
the stronger the surface bond.

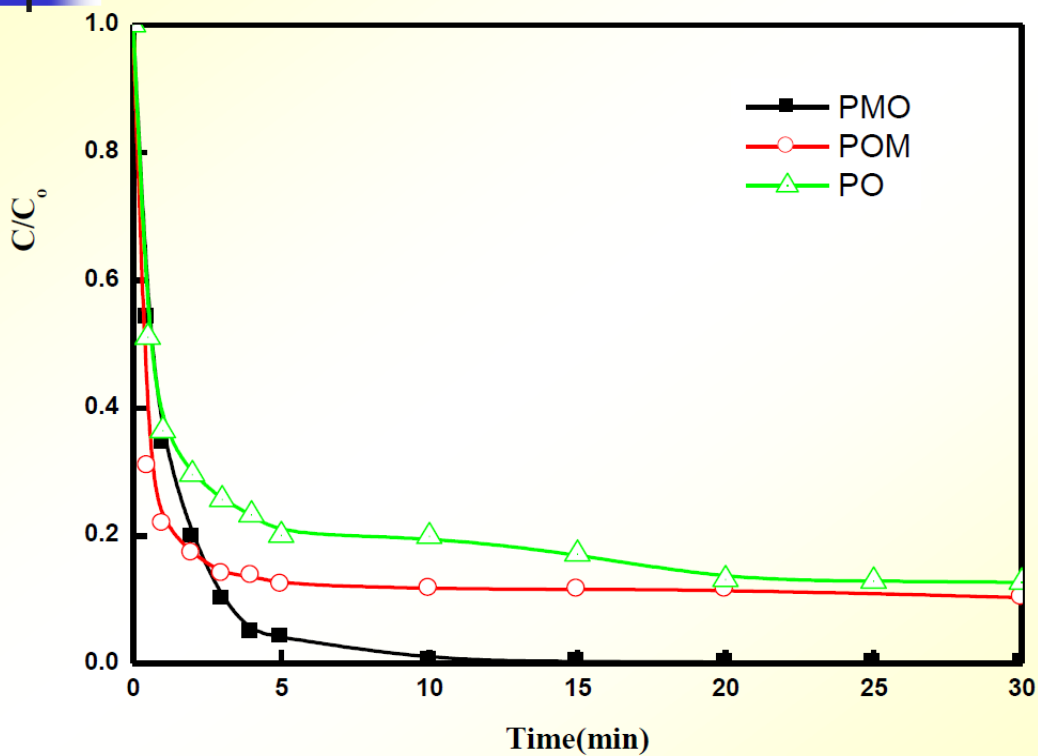
	2CP	3CP	4CP
pK _a	8.48	9.12	9.38

----->

4-NP (200 ppm)

MECD

[H⁺] = 1 M, 40 °C, variation of NiO_x



Optimized MECD Conditions

	Phenol	2CP	3CP	4CP	4NP
PO	0.646* (pH7, 40 °C)	0.115 (pH4, 40 °C)	0.044 (pH4, 40 °C)	0.010 (pH4, 70 °C)	0.185 (pH0, 40 °C)
PMO	0.301 (pH7, 40 °C)	0.385 (pH4, 40 °C)	0.034 (pH4, 40 °C)	0.135 (pH4, 70 °C)	0.371 (pH0, 40 °C)
POM	0.043 (pH7, 40 °C)	0.133 (pH4, 40 °C)	0.273 (pH4, 40 °C)	0.637 (pH4, 70 °C)	0.185 (pH0, 40 °C)

* : Rate constant (min⁻¹)

Pollutant	Method	Catalyst	Activity	Author
phenol	Catalytic oxidation	NiO _x	30 min, 100%, 200 ppm	Christoskova et.al.
phenol	MECD	NiO _x (PO)	8 min, 100 %, 200 ppm	Lai et.al.
2-CP	Photo-Fenton degradation	[Fe ²⁺] 70 ppm [H ₂ O ₂] 700 ppm	15 min, 96.4 %, 124 ppm	Moya et. al.
2-CP	MECD	NiO _x (PMO)	10 min, 100 %, 200 ppm	Lai et.al.
3-CP	UV-assisted degradation	TiO ₂ /AC	2 h, 100 %, 40 ppm	El-Sheikh et. al.
3-CP	MECD	NiO _x (POM)	10 min, 100 %, 200 ppm	Lai et.al.
4-CP	Microwave-enhanced AOP	AOP	60 min, 100 %, 30 ppm	Horikoshi et. al.
4-CP	MECD	NiO _x (POM)	5 min, 100 %, 200 ppm	Lai et.al.
4-NP	Electro-Fenton degradation	Fe ²⁺	120 min, 100 %, 28 ppm	Yuan et. al.
4-NP	MECD	NiO _x (PMO)	15 min, 100 %, 200 ppm	Lai et.al.