

화학공학 분야에서 통계적 실험계획법 적용에 대한 서지 검토

유계상[†]

서울과학기술대학교 화공생명공학과
(2020년 3월 4일 접수, 2020년 3월 19일 심사, 2020년 3월 23일 채택)

Application of Statistical Design of Experiments in the Field of Chemical Engineering: A Bibliographical Review

Kye Sang Yoo[†]

Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro,
Nowon-gu, Seoul 01811, Korea
(Received March 4, 2020; Revised March 19, 2020; Accepted March 23, 2020)

초 록

통계학적 실험계획법(DOE)은 수십 년 동안 산업계에서 품질을 개선하기 위해 사용되어온 방법이다. 본 연구에서는 화학공학 분야에서 통계적 실험계획법이 적용된 사례 115건을 검토해 보았다. 모든 사례는 지난 10년간 주요 과학 저널에 발표된 내용이다. 적용되는 설계 유형, 실험 규모, 반응 변수에 영향을 미치는 요인 및 수준의 수 및 적용 분야가 분석되었다. 무엇보다 통계학적 실험계획법에 관련된 연구논문이 점차 증가하는 것을 알 수 있었다.

Abstract

Design of experiments (DOE) is a method that has been applied in the industry to improve value for many decades. This study provides an overview of 115 cases of statistical DOE applications in the field of chemical engineering. All cases were published in important scientific journals for the last ten years. The applied design type, the experiment size, the number of factors and levels affecting the response variable, and the area of application for the design were all analyzed. Obviously, the number of publications related with statistical DOE increased over time.

Keywords: Design of experiments, Chemical engineering applications, Bibliographical

1. 서 론

실험계획법(Design of Experiment: DOE)이란 실험목적에 부합한 실험 방법을 제시하고, 결과적으로 수집한 자료의 취급방법과 통계적 자료해석에 의해 최소의 실험 횟수만으로도 최대의 정보를 얻을 수 있게 사전에 실험 내용을 계획하는 것이다. 실험계획법은 1920년대에서 1930대 사이에 유전학자인 R. A. Fisher에 의해 농업 및 생물분야에서 시작되었고, 최근에는 오히려 제조업 분야에서 주로 활용되고 있다. 특히 6시그마 방법의 핵심 요소로서 생산 현장에서 품질관리와 공정관리를 위하여 실험계획법을 적극적으로 활용하고 있다. 하지만 생산현장에서 사용되는 실험계획법은 비교적 단순한 공정변수에 따른 결과에 대한 예측 및 분석으로 고도화된 첨단 공정 및 연구분야에서의 적용은 아직까지 미진한 실정이다. 이에 실험계획법이 이론적인

연구에서 벗어나 실제 다양한 분야에서 어떻게 활용되고 있는지에 대한 고찰이 필요하다.

1.1. Objective of the study

실험계획법에 관련된 문헌은 통계학적인 관점에서 기술된 이론적 측면에 대해 주로 발표되었다. 대표적으로 ‘Design and Analysis of Experiment’[1]나 ‘Statistics for Experiment’[2]와 같은 저서를 통해 발표되었다. 그러나 DOE를 실제 산업에 적용하는 경우에 대한 연구는 활발하지 않은 게 현실이다. 특히 공학 분야에서 DOE에 대한 실용적이고 실제적으로 적용 사례는 많지 않다. 하지만 몇몇의 학자들이 통계학적 DOE를 공학 분야에 적용한 사례에 관한 조사를 실시하여 발표하였다. 1992년에 Bisgaard[3]는 1975년부터 발표된 공학 분야에 실험계획법을 적용한 131건의 사례 연구를 조사하였다. Prvan과 Street [4]는 2002년에 다양한 분야에서 실험계획법 중 요인설계법을 이용한 140건의 적용사례를 조사하였다. 이 중에는 38건은 공학 분야의 연구로 보고되었다. 2008년 Ilzarbe[5] 등은 2001년부터 2005년 사이에 발표된 공학분야에 관련된 실제적인 실험계획법 논문 77편에 대해서 조사하였다.

[†] Corresponding Author: Seoul National University of Science & Technology, Department of Chemical & Biomolecular Engineering, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea
Tel: +82-2-970-6602 e-mail: kyoo@snut.ac.kr

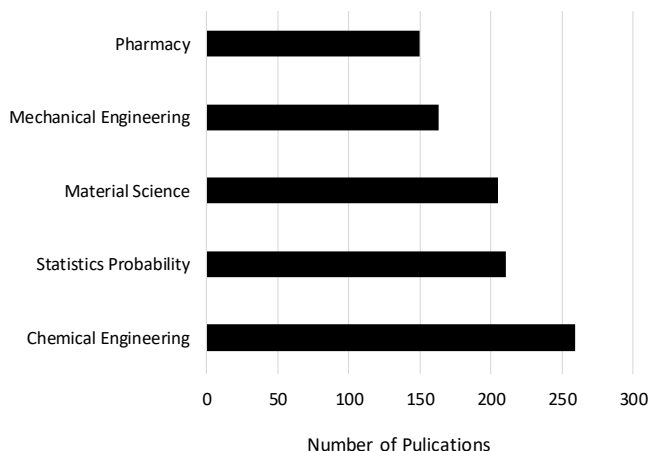


Figure 1. Number of papers by research area related to DOE published since 1961.

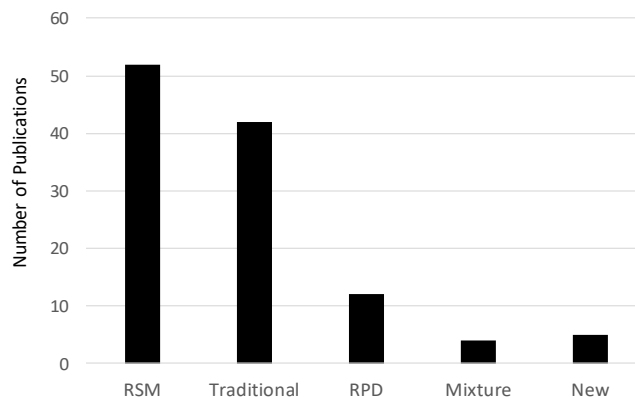


Figure 3. Aim of the study.

우리는 모두 115편으로 조사되었다. 이렇게 선택된 논문을 이용하여 보다 자세한 내용분석을 수행하였다.

2. 분석 결과

2.1. Aim of the study

실험계획법을 실제 실험에 적용할 때 통산적으로 Wu와 Hamada가 제시한 세 가지 유형으로 분류할 수 있다[6]. 첫 번째 유형은 ‘traditional’로 정의된 경우로 반응 변수에 따른 요인의 영향을 이해하는 것으로 screening 및 characterization 단계가 포함된다. 두 번째 유형은 “response surface methodology” (RSM)로 정의된 경우로 프로세스 동작에 대한 이해와 최적의 성능 포인트를 찾는 방법이다[7]. 세 번째 유형은 “robust parameter design” (RPD)로 정의된 경우로 노이즈 요인에서 전송되는 변동성을 최소화하는 제어 가능한 설계 요인의 설정을 찾는데 사용된다[8]. 이 밖에도 인자들의 배합비율을 조사하는 실험계획법으로 인자들의 배합비의 합이 100%를 이루는 “mixture” 설계 및 새로운 방법론들이 연구되고 있다.

이를 토대로 본 연구에서 조사한 115편의 논문의 유형별로 분류해 보았다. Figure 3에 도시한 바와 같이 RSM가 전체의 45%에 해당되었다. 그 다음은 traditional 방법으로 37%가 해당되었다. RPD는 10%를 점유하였고 나머지는 각각 4%가 해당되었다. 이는 비록 적용 분야에 다소 차이는 있지만 10년 전에 비해서 RSM 방법에 대한 연구는 점차 증가하고 traditional 방법은 감소하는 것으로 조사되었다[5]. 특히 화학공학 분야의 특성상 Mixture 법의 사용이 증가하는 것도 주목할 필요가 있다.

2.2. Number of factors and levels

Aim of study가 결정되면 실험 설계의 다음 단계는 실험의 내용을 구성할 인자(factor)와 수준(level)을 결정하는 것이다. 인자는 반응 변수에 영향을 준다고 생각되는 많은 원인들 중에서 직접 실험에 취급되는 원인에 해당한다. 예를 들면 화학공정에서 온도, 압력, 조성 등이 이에 해당한다. 본 연구에서 조사된 논문에서 사용된 인자의 수를 Figure 4에 분석하였다. 실제 적용 사례의 90%에서 요인의 수가 5 이하임을 알 수 있다. 사용된 요인의 평균 수는 6.2이고 13가지 이상의 요소가 사용된 논문은 없었다. 최근에는 traditional 방법을 이용해서 주요 요인의 수를 선별한 후 RSM을 사용하는 논문이 발표되고 있어 요인의 수는 크게 증가하지 않고 있다.

본 연구에서 조사된 논문에서 사용된 수준의 수를 분석해서 Figure

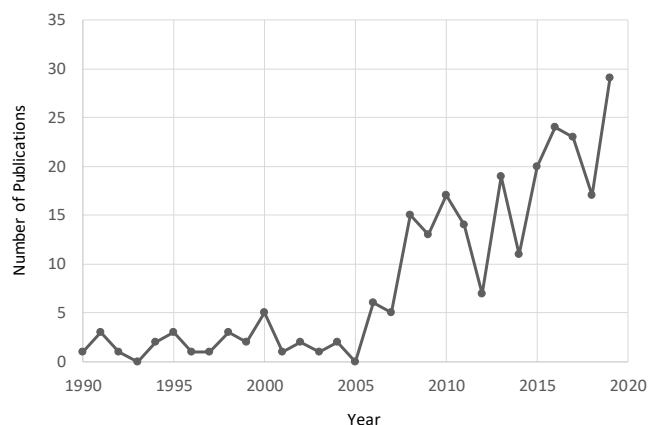


Figure 2. Yearly numbers of papers related to DOE published after 1990.

본 연구의 목적은 지난 10년간(2010~2019년) 화학공학 분야에서 SCI급 논문에 발표된 통계학적 DOE가 적용된 실제 사례를 수집하고 응용에 대한 설명 연구를 수행하는 것이다. 수집된 사례들은 학자, 컨설턴트 및 실무자들에게 해당 분야에 맞는 응용 사례를 찾을 수 있는 기회를 제공한다. 또한 실무자들이 본 사례를 통해 관련된 기술을 실제로 어떻게 적용할 수 있는지 배울 수 있는 장점이 있다.

1.2. Database used in the study

본 연구에 필요한 자료를 수집하기 위하여 대표적인 데이터베이스인 ‘Web of Science’를 이용하였다. 먼저 검색 년도를 1960년부터 2019년으로 지정하였다. 검색대상에 “제목”을 선택한 후 “design* of experiment*”를 입력하여 검색을 수행하였다. 그 결과 모두 2,316개의 자료가 검색되었다. 이 중 분야별로 발표된 논문의 수가 많은 상위 5개 분야를 조사하였다. Figure 1과 같이 chemical engineering이 259개로 가장 높은 빈도를 보였다. 이를 본격적으로 연구결과가 나타나기 시작한 1990년부터 연도별로 발표된 논문의 수를 Figure 2에 도시하였다. 2008년 이후부터 점차적으로 발표되는 논문의 숫자가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 중 지난 10년간 발표된 article만 screening한 결과 174개의 논문으로 정리되었다. 이들 논문의 내용 분석 결과 통계학적 실험계획법을 이용하여 화학공학 분야에 실제적으로 적용한 경

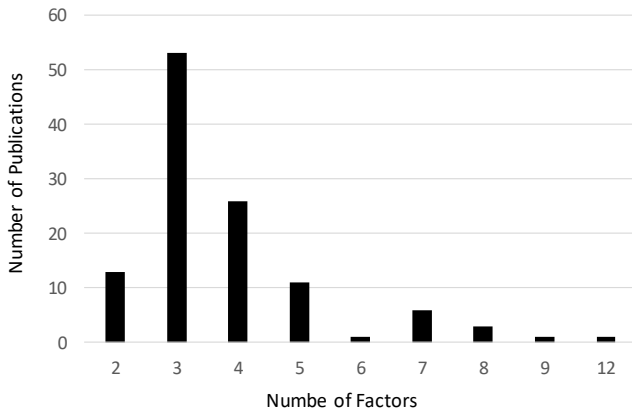


Figure 4. Number of factors included in the study.

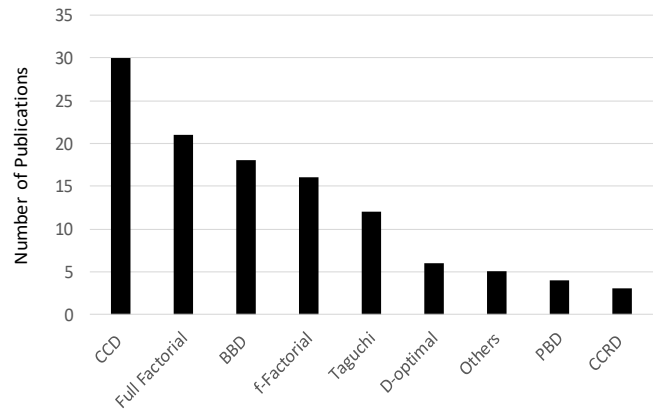


Figure 6. Type of design included in the study.

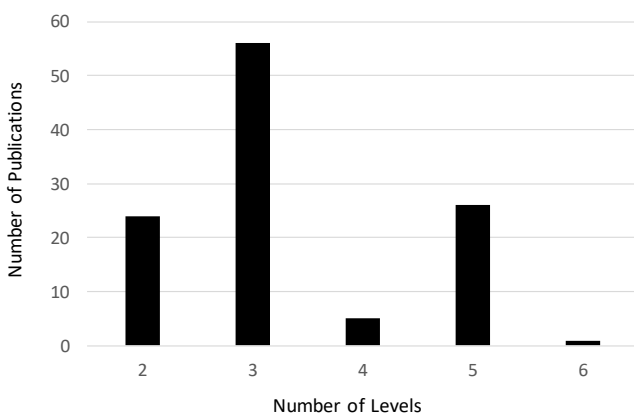


Figure 5. Number of levels included in the study.

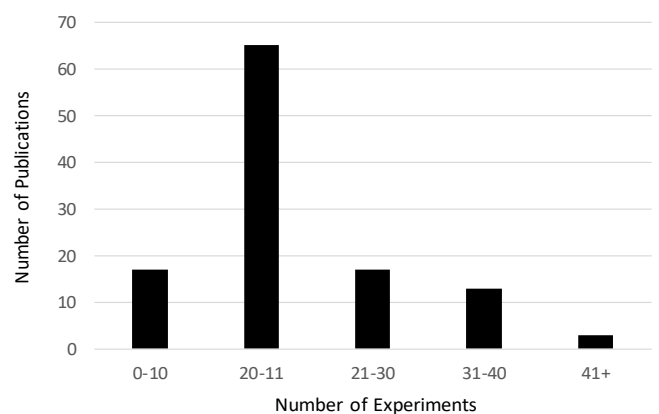


Figure 7. Number of experiments included in the study.

5에 도시하였다. 수준은 실험을 하기 위한 인자의 조건, 즉 공정에 영향을 주는 요인들의 변화량이다. 예를 들어 온도의 경우 50, 100, 200 °C로 실험 조건을 설정하면 수준이 3이 되는 것이다. 사례에서 사용된 수준의 50% 정도는 3으로 가장 많이 사용되었다. 그 다음으로는 5와 2 순으로 사용되었고 7 이상의 수준은 사용되지 않았다.

2.3. Type of design

실험 계획법의 다음 단계는 사용할 설계 디자인 유형을 선택하는 것이다. 화학공학 분야에 적용된 설계 디자인 유형별 논문 수를 분석하여 Figure 6에 제시하였다. 먼저 반응 표면 분석법(RSM) 중에서는 2차 회귀모형(second order regression model)이 적절하다고 생각될 경우에 사용하는 중심합성계획(central composite design)법, Box-Behnken 계획법 및 회전중심합성계획(central composite rotatable design)이 사용되었다. 실제 화학공학 실험에서 실험조건을 변경시키는 경우 실험을 추가로 실시하는 데 시간과 비용이 많이 든다. 따라서 적은 실험횟수로 2차 다항모형의 회귀계수를 추정할 수 있는 효율적인 실험법인 CCD가 가장 많이 사용된다. 본 연구에서도 조사된 사례 중 26%가 CCD 법으로 가장 많이 사용되었다. 또한 회귀식에서 원점에서 동일한 거리에 있는 좌표에서 추정된 회귀식의 분산 크기가 같다는 가정하에 실험을 설계하는 CCRD 법도 일부 사용되었다(3%). 이 밖에도 인자가 계량 인자이고 수준이 3인 경우 2차 회귀방정식을 구하고 최적의 조건도 찾을 수 있는 Box-Behnken 법이 16% 정도 사용된 것으로 조사되었다.

전통적인 실험계획법인 요인배치법(factorial design)도 화학공학 분야에서 많이 사용되고 있다. 실험인자의 모든 수준조합에서 실험을 수행하는 full factorial 배치법이 18%로 두 번째로 많이 사용된 설계 디자인 유형이었다. 불필요한 교호작용이나 고차의 교호작용은 구하지 않고 각 인자의 조합 중에서 일부만 선택하여 실험하는 일부실험법(fractional factorial design)도 14% 정도 사용된 것으로 조사되었다. 품질관리 분야에서 획기적인 기여를 한 Taguchi 법의 경우 화학공학 분야에서는 널리 사용되고 있지는 않는 것으로 조사되었다. 약 10% 정도의 논문에서 Taguchi 법을 이용한 실험계획법의 연구 사례로 발표되었다. 추가적인 설계 디자인 유형으로 D-optimal 법이 5%, Plackett-Burmann 법이 4% 정도 사용된 것으로 분석되었다. 이외에도 Bayesian, IV-optimal, Definitive Screening Design 법을 설계 디자인으로 사용한 논문이 소개되었다.

2.4. Number of experiments

설계 유형과 연구에 포함된 요소의 수를 선택한 후에는 수행할 실험 수를 결정해야 한다. 가용 예산, 앞에서 언급한 변수(인자 및 설계 유형) 및 실험의 반복여부 등 실험자의 의견에 따라 실험의 횟수는 결정된다. Figure 7에서 볼 수 있듯이 57%의 사례에서 11~20개 실험을 수행하였다. 10개 이하의 실험을 수행한 경우와 21~30개의 실험을 수행한 경우가 각각 15%를 차지하였다. 31~40개의 실험을 수행한 경우는 11%이고 41개 이상의 실험을 수행한 경우는 3%에 불과하였다. 이처럼 대부분의 경우 30개 이하에서 실험을 진행하여 연구를 수행하였다.

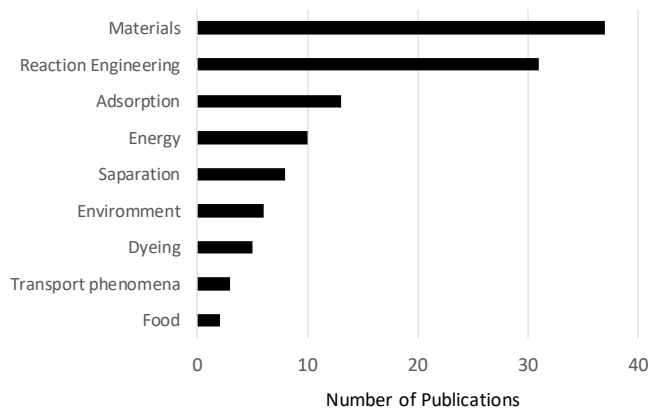


Figure 8. Field of applications included in the study.

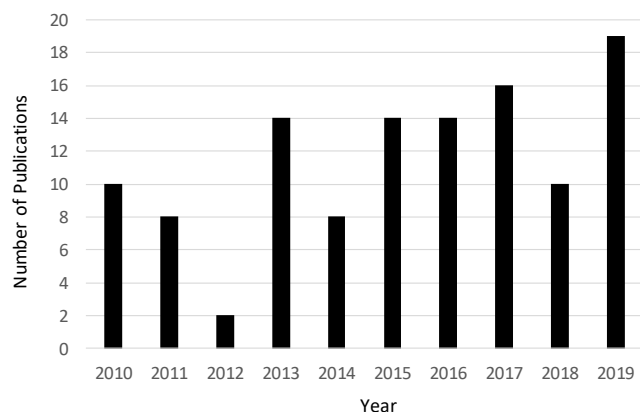


Figure 9. Evolution of papers over time.

2.5. Field of application

본 연구에서 조사된 사례들의 연구분야를 보다 구체적으로 분석하여 Figure 8에 도시하였다. 가장 많이 연구된 분야로는 재료분야와 반응공학 분야이다. 이는 재료 합성 및 반응공정에 영향을 미치는 변수가 많기 때문에 실험계획법을 이용하면 연구에 효율적인 정보를 제공할 수 있기 때문으로 사료된다. 다음으로는 흡착공정 연구에 많이 사용되었다. 이는 반응공학과 유사하게 여러 가지 공정변수가 실험결과에 영향을 미치기 때문이다. 그 다음으로는 에너지, 분리공정, 환경, 염색, 이동현상 및 식품공정 순으로 연구가 진행되었다.

2.6. Number of publications over time

지난 10년 동안 화학공학 분야의 SCI급 저널에 발표된 실험계획법에 관련된 논문의 수를 Figure 9에 도시하였다. 발표된 논문의 수는 지속적으로 증가하였고 이는 DOE가 연구자들 사이에 점차 많이 알려졌고 이를 이용하는 컴퓨터 프로그램도 발달했기 때문이다. 하지만 다른 분야와 다르게 보수적인 경향이 강한 화학공학 분야에서는 실험계획법을 이용한 연구결과에 대한 신뢰도가 높은 편은 아니다. 따라서 향후 이와 같은 인식개선이 이루어진다면 보다 많은 연구자들이 실험계획법을 이용한 연구에 관심을 갖게 될 것으로 생각된다.

3. 결 론

DOE는 주로 제품 및 프로세스 최적화에 사용되는 유용한 기술이다. 이 기술을 최대한 활용하려면 도구에 대한 깊은 지식을 가진 사람들, 프로세스에 대한 실질적인 지식을 가진 사람들, 실험 분야에서 경험이 있는 사람들로 구성된 작업 팀을 구성해야 한다. 화학공학 분야에서 이 기술의 사용을 개선하려면 통계학 개념과 실용적인 지식을 결합하는 수단을 찾아야 한다. 지난 10년간 출판된 화학공학 분야에서 DOE의 실제 응용에 대한 논문의 수가 증가함에 따라 그 사용이 확산되고 있으며 더 자주 적용되고 있음을 알 수 있다.

본 논문을 통해 학계, 컨설턴트 및 실무자에게 해당 분야에서 응용 프로그램을 찾을 수 있는 기회를 제공하기를 바란다. DOE는 다양한 화학공학 분야에 적용될 수 있는 기술이기 때문에 주목해야 한다. 따라서 향후 DOE를 이용한 연구가 보다 활발히 진행되고 보다 많은 연구 논문이 발간되어 엔지니어링 커뮤니티 전체에 DOE 사용을 확산시킬 기대한다.

4. 분석자료

1. C. Waldron, A. Pankajakshan *et al.*, Closed-loop model-based design of experiments for kinetic model discrimination and parameter estimation: Benzoic acid esterification on a heterogeneous catalyst, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **v58**, 22165-22177 (2019).
2. T. H. Loutas, G. Sotiriadis *et al.*, Investigation of a pulsed laser ablation process for bonded repair purposes of CFRP composites via peel testing and a design-of-experiments approach, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **v95**, 102407 (2019).
3. A. S. Yusuff, Optimization of adsorption of Cr(VI) from aqueous solution by adsorbent prepared from *Leucaena leucocephala* seed shell using design of experiment, *Separation Science and Technology*, **v54**, 2418-2430 (2019).
4. U. Morali, H. Demiral *et al.*, Synthesis of carbon molecular sieve for carbon dioxide adsorption: Chemical vapor deposition combined with Taguchi design of experiment method, *Powder Technology*, **v355**, 716-726 (2019).
5. F. E. M. Spanemberg, A. L. Korzenowski *et al.*, Effects of sugar composition on shelf life of hard candy: Optimization study using D-optimal mixture design of experiments, *Journal of Food Process Engineering*, **v42**, 13213 (2019).
6. T. R. Bai, K. Kobayashi *et al.*, Supercritical CO₂ dyeing for nylon, acrylic, polyester, and casein buttons and their optimum dyeing conditions by design of experiments, *Journal of CO₂ Utilization*, **v33**, 253-261 (2019).
7. S. Faisal, A. Tronci *et al.*, Right-first-time dyeing: A design of experiments approach for the optimisation of dyeing-processes using hard water, *Pigment & Resin Technology*, **v48**, 449-455 (2019).
8. R. Rezaei, G. Moradi *et al.*, Dry reforming of methane over Ni-Cu/Al₂O₃ catalyst coatings in a microchannel reactor: Modeling and optimization using design of experiments, *Energy & Fuels*, **v33**, 6689-6706 (2019).
9. D. Voss, H. Pickel *et al.*, Improving the fractionated catalytic ox-

- idation of lignocellulosic biomass to formic acid and cellulose by using design of experiments, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **v7**, 9754-9762 (2019).
10. B. Petrovic and S. M. Soltani, Optimization of post combustion CO₂ capture from a combined-cycle gas turbine power plant via Taguchi design of experiment, *Processes*, **v7**, 364 (2019).
 11. B. MacQueen, E. Barrow *et al.*, Optimum reaction conditions for 1,4-anhydroerythritol and xylitol hydrodeoxygenation over a ReOx-Pd/CeO₂ catalyst via design of experiments, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **v58**, 8681-8689 (2019).
 12. H. Malekhosseini, K. Mahanpoor *et al.*, Kinetic modeling and photocatalytic reactor designed for removal of resorcinol in water by nano ZnFe₂O₄/copper slag as catalyst: Using full factorial design of experiment, *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-International English Edition*, **v38**, 257-266 (2019).
 13. C. Marion, R. Langlois *et al.*, A design of experiments investigation into the processing of fine low specific gravity minerals using a laboratory Knelson concentrator, *Minerals Engineering*, **v135**, 139-155 (2019).
 14. S. Denraah and M. Sarkar, Design of experiment for optimization of nitrophenol reduction by green synthesized silver nanocatalyst, *Chemical Engineering Research & Design*, **144**, 494-504 (2019).
 15. M. C. Vebber, J. D. Crespo *et al.*, Self-assembled thin films of PAA/PAH/TiO₂ for the photooxidation of ibuprofen. Part I: Optimization of photoactivity using design of experiments and surface response methodology, *Chemical Engineering Journal*, **v360**, 1447-1458 (2019).
 16. N. Assas, Z. Elbahri *et al.*, Effects of some process parameters on the niflumic acid controlled release polymeric microspheres: Optimization using designs of experiments, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, **v14**, 2283 (2019).
 17. M. Bahrami, M. J. Amiri *et al.*, Optimization of the lead removal from aqueous solution using two starch based adsorbents: Design of experiments using response surface methodology (RSM), *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **v7**, 102793 (2019).
 18. M. A. Sedghamiz, S. Raeissi *et al.*, *In-situ* transesterification of residual vegetable oil in spent bleaching clay with alkali catalysts using CCD-RSM design of experiment, *Fuel*, **v237**, 515-521 (2019).
 19. A. Teimouri, N. Ghased *et al.*, Statistical design of experiment as a tool for optimization of methylene blue sorption on CS/MCM-41/nano-gamma alumina as a novel and environmentally friendly adsorbent: Isotherm and kinetic studies, *Desalination and Water Treatment*, **v139**, 327-341 (2019).
 20. G. Tian, Y. D. Wei *et al.*, Application of near-infrared spectroscopy combined with design of experiments for process development of the pulsed spray fluid bed granulation process, *Powder Technology*, **v339**, 521-533 (2018).
 21. A. Caradonna, F. Tagliaferro *et al.*, Laser printing of conductive tracks with extremely low electrical resistance on polymer-carbon nanotubes composite: An optimization study of laser setup parameters by design of experiment approach, *Polymer Engineering and Science*, **v58**, 1485-1493 (2018).
 22. A. T. Stiolica, M. V. Bubulica *et al.*, A design of experiment approach to the synthesis of alendronate-incorporated hydroxyapatite, *Revista de Chimie*, **v69**, 1944-1948 (2018).
 23. M. Losno, I. Ferrante *et al.*, Design of experiments as tools to tailor impregnated polymers specific for radionuclides separation in microsystems, *Reactive & Functional Polymers*, **v127**, 48-54 (2018).
 24. A. Dawiec-Lisniewska, D. Podstawczyk *et al.*, Concentration of fruit juice aroma compound from model multicomponent solution and natural apple juice hydrolate: Optimization and modeling by design of experiment, *Journal of Food Process Engineering*, **v41**, 12669 (2018).
 25. R. Galaverna, M. C. Breitreitz *et al.*, Conversion of D-fructose to 5-(Hydroxymethyl)furfural: Evaluating batch and continuous flow conditions by design of experiments and in-line FTIR monitoring, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **v6**, 4220-4230 (2018).
 26. E. Kashani, A. Mohebbi *et al.*, CFD simulation of the preheater cyclone of a cement plant and the optimization of its performance using a combination of the design of experiment and multi-genetic programming, *Powder Technology*, **v327**, 430-441 (2018).
 27. S. Kordic, G. Matijasic *et al.*, Prediction of particle size distribution of dronedarone hydrochloride in spiral jet mill using design of experiments, *Chemical Engineering Communications*, **v205**, 197-206 (2018).
 28. S. P. Manikandan and R. Baskar, Assessment of the influence of graphene nanoparticles on thermal conductivity of graphene/water nanofluids using factorial design of experiments, *Periodica Polytechnica-Chemical Engineering*, **v62**, 317-322 (2018).
 29. S. L. Chavan and D. B. Talange, Statistical design of experiment approach for modeling and optimization of PEM fuel cell, *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, **v40**, 830-846 (2018).
 30. F. Reichmann, F. Varel *et al.*, Energy optimization of gas-liquid dispersion in micronozzles assisted by design of experiment, *Processes*, **v5**, 57 (2017).
 31. L. D. Guedes, I. C. S. F. Jardim *et al.*, Study of the effect of the operating parameters on the separation of bioactive compounds of palm oil by ultra-high performance supercritical fluid chromatography using a design of experiments approach, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **v95**, 2306-2314 (2017).
 32. E. Nourafkan, H. Gao *et al.*, Formulation optimization of reverse microemulsions using design of experiments for nanoparticles synthesis, *Chemical Engineering Research & Design*, **v125**, 367-384 (2017).
 33. M. Al-Dahhan, S. Aradhya *et al.*, Prediction of spout diameter in gas-solid spouted beds using factorial design of experiments approach with the aid of advanced optical fiber probe, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **v95**, 1463-1470 (2017).
 34. M. J. Rushwaya and S. Ndlovu, Purification of coal fly ash leach liquor by solvent extraction: Identification of influential factors using design of experiments, *International Journal of Mineral Processing*, **v164**, 11-20 (2017).

35. A. T. Stiolica, M. Popescu *et al.*, Optimization of gold nanoparticles synthesis using design of experiments technique, *Revista de Chimie*, **v68**, 1518-1523 (2017).
36. L. F. Chen, Y. G. Ma *et al.*, Quantifying the effects of operational parameters on the counting efficiency of a condensation particle counter using response surface Design of Experiments (DoE), *Journal of Aerosol Science*, **v106**, 11-23 (2017).
37. R. R. Palkar and V. Shilapuram, Detailed parametric design methodology for hydrodynamics of liquid-solid circulating fluidized bed using design of experiments, *Particuology*, **v31**, 59-68 (2017).
38. H. Alijani, M. H. Beyki *et al.*, A nanohybrid of mixed ferrite-polyaniline derivative copolymer for efficient adsorption of lead ions: Design of experiment for optimal condition, kinetic and isotherm study, *Desalination and Water Treatment*, **v66**, 338-345 (2017).
39. A. Ortiz-Fernandez, F. A. Carrillo-Sanchez *et al.*, Design of experiments for optimization a biodegradable adhesive based on ramon starch (*Brosimum alicastrum* Sw.), *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **v73**, 28-37 (2017).
40. J. Lasprilla-Botero, M. Alvarez-Lainez *et al.*, Water-based adhesive formulations for rubber to metal bonding developed by statistical design of experiments, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **v73**, 58-65 (2017).
41. L. F. Chen, L. Y. Feng *et al.*, Quantifying the effects of fuel compositions and process variables on planar surface area and spray nonuniformity via combined mixture-process design of experiment, *Atomization and Sprays*, **v27**, 707-722 (2017).
42. M. Korkmaz, C. Ozmetin *et al.*, Full factorial design of experiments for boron removal from solutions by purolite S 108 resin converted to hydroxyl form, *Particulate Science and Technology*, **v35**, 742-748 (2017).
43. H. Dalvadi, N. Patel *et al.*, Systematic development of design of experiments (DoE) optimized self-microemulsifying drug delivery system of zotepine, *Journal of Microencapsulation*, **v34**, 308-318 (2017).
44. E. Gilca, A. Maicaneanu *et al.*, ZnCl₂ sorption on amberlite IRA410 resin using Taguchi's methodology for design of experiments, *Chemical Engineering Communications*, **v204**, 382-387 (2017).
45. Siddhartha, A. K. Singh *et al.*, Exploring the possibility of utilization of red mud epoxy based functionally graded materials as wear-resistant materials using Taguchi design of experiment, *Advances in Polymer Technology*, **v36**, 5-22 (2017).
46. K. Sivagami, R. R. Krishna *et al.*, Optimization studies on degradation of monocrotophos in an immobilized bead photo reactor using design of experiment, *Desalination and Water Treatment*, **v57**, 28822-28830 (2016).
47. M. Kapur, R. Gupta *et al.*, Parametric optimization of Cu (II) and Ni (II) adsorption onto coal dust and magnetized sawdust using Box-Behnken design of experiments, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **v35**, 1597-1604 (2016).
48. S. Rangabhashiyam, M. S. G. Nandagopal *et al.*, Use of Box-Behnken design of experiments for the adsorption of chromium using immobilized macroalgae, *Desalination and Water Treatment*, **v57**, 26101-26113 (2016).
49. O. P. Sharma, V. Patel *et al.*, Design of experiment approach in development of febuxostat nanocrystal: Application of soluplus (R) as stabilizer, *Powder Technology*, **v302**, 396-405 (2016).
50. S. Masoumi, K. Rahimi *et al.*, Investigation of key factors and their interactions in MTO reaction by statistical design of experiments, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, **v14**, 1047-1057 (2016).
51. S. Ranganathan, J. Tebbe *et al.*, Optimization of the lipase mediated epoxidation of monoterpenes using the design of experiments-Taguchi method, *Process Biochemistry*, **v51**, 1479-1485 (2016).
52. R. P. Cabral, A. M. L. Sousa *et al.*, Design of experiments approach on the preparation of dry inhaler chitosan composite formulations by supercritical CO₂-assisted spray-drying, *Journal of Supercritical Fluids*, **v116**, 26-35 (2016).
53. F. M. Elfighi, A hybrid statistical approach for modeling and optimization of RON: A comparative study and combined application of response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) based on design of experiment (DOE), *Chemical Engineering Research & Design*, **v113**, 264-272 (2016).
54. S. G. Barbosa, L. Peixoto *et al.*, A design of experiments to assess phosphorous removal and crystal properties in struvite precipitation of source separated urine using different Mg sources, *Chemical Engineering Journal*, **v298**, 146-153 (2016).
55. I. Ailiesei, V. Anuta *et al.*, Application of statistical design of experiments for the optimization of clodronate loaded liposomes for oral administration, *Revista de Chimie*, **v67**, 1566-1570 (2016).
56. M. Mouelhi, I. Marzouk *et al.*, Optimization studies for water defluoridation by adsorption: Application of a design of experiments, *Desalination and Water Treatment*, **v57**, 9889-9899 (2016).
57. A. Hafizi and M. R. Rahimpour, Hydrogen production by chemical looping steam reforming of methane over Mg promoted iron oxygen carrier: Optimization using design of experiments, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **v62**, 140-149 (2016).
58. L. Bahloul, F. Bendebane *et al.*, Effects and optimization of operating parameters of anionic dye extraction from an aqueous solution using an emulsified liquid membrane: Application of designs of experiments, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **v59**, 26-32 (2016).
59. L. S. Su, J. B. Zhang *et al.*, Identifying main factors of capacity fading in lithium ion cells using orthogonal design of experiments, *Applied Energy*, **v163**, 201-210 (2016).
60. M. Behjoomanesh, M. Keyhani *et al.*, Assessment of total oil production in gas-lift process of wells using, Box-Behnken design of experiments in comparison with traditional approach, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **v27**, 1455-1461 (2015).
61. K. Papadopoulou, V. Dimitropoulos *et al.*, Assessment of *Pleurotus ostreatus* mediated degradation of agro-residues by using design of experiments methodologies, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **v35**, 1597-1604 (2016).

- inable Energy, **v34**, 1705-1713 (2015).
62. R. Palanivelan, S. Rajakumar *et al.*, Optimization of prime parameters for textile dye decolorization by design of experiments (DOEs) using *Lysinibacillus fusiformis* M1, *Desalination and Water Treatment*, **v56**, 1077-1089 (2015).
 63. A. Montes, C. Pereyra *et al.*, Screening design of experiment applied to the supercritical antisolvent precipitation of quercetin, *Journal of Supercritical Fluids*, **v104**, 10-18 (2015).
 64. A. Komesu, P. F. M. Martinez *et al.*, Lactic acid purification by reactive distillation system using design of experiments, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **v95**, 26-30 (2015).
 65. L. F. Chen, Z. C. Zhang *et al.*, Quantifying the effects of fuel compositions on GDI-derived particle emissions using the optimal mixture design of experiments, *Fuel*, **v154**, 252-260 (2015).
 66. V. Maheshwari, G. P. Rangaiah *et al.*, Application of design of experiments in hemodialysis: Optimal sampling protocol for beta(2)-microglobulin kinetic model, *Chemical Engineering Science*, **v131**, 84-90 (2015).
 67. S. Madani, R. Gheshlaghi *et al.*, Optimization of the performance of a double-chamber microbial fuel cell through factorial design of experiments and response surface methodology, *Fuel*, **v150**, 434-440 (2015).
 68. P. Sethapokin, S. Kunatippapong *et al.*, Estimation of kinetic parameters for the reactor model of the phthalic anhydride production by the design of experiments, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **v24**, 51-58 (2015).
 69. O. Kokkilic, R. Langlois *et al.*, A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson concentrator, *Minerals Engineering*, **v72**, 73-86 (2015).
 70. M. Kavitha, R. Subramanian *et al.*, Optimization of process parameters for solution combustion synthesis of strontium substituted hydroxyapatite nanocrystals using design of experiments approach, *Powder Technology*, **v271**, 167-181 (2015).
 71. A. A. Kharia and A. K. Singhai, Development and optimisation of mucoadhesive nanoparticles of acyclovir using design of experiments approach, *Journal of Microencapsulation*, **v32**, 521-532 (2015).
 72. W. Yu, A. Varavei *et al.*, Optimization of shale gas production using design of experiment and response surface methodology, *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, **v37**, 906-918 (2015).
 73. R. K. Deshmukh and J. B. Naik, The impact of preparation parameters on sustained release aceclofenac microspheres: A design of experiments, *Advanced Powder Technology*, **v26**, 244-252 (2015).
 74. G. J. Swamy, A. Sangamithra *et al.*, Response surface modeling and process optimization of aqueous extraction of natural pigments from *Beta vulgaris* using Box-Behnken design of experiments, *Dyes and Pigments*, **v111**, 64-74 (2014).
 75. M. S. R. Abbott, A. P. Harvey *et al.*, Rapid determination of the residence time distribution (RTD) function in an oscillatory baffled reactor (OBR) using a design of experiments (DoE) approach, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, **v12**, 575-586 (2014).
 76. L. Moreno-Vilet, J. Bonnin-Paris *et al.*, Assessment of sugars separation from a model carbohydrates solution by nanofiltration using a design of experiments (DoE) methodology, *Separation and Purification Technology*, **v131**, 84-93 (2014).
 77. M. Maiti, V. K. Srivastava *et al.*, Process parameter optimization through Design of Experiments in synthesis of high cis-polybutadiene rubber, *Chemical Engineering Science*, **v107**, 256-265 (2014).
 78. A. Shemi, S. Ndlovu *et al.*, Extraction of aluminium from coal fly ash: Identification and optimization of influential factors using statistical design of experiments, *International Journal of Mineral Processing*, **v127**, 10-15 (2014).
 79. V. Jollet, C. Gissane *et al.*, Optimization of the neutralization of red mud by pyrolysis bio-oil using a design of experiments approach, *Energy & Environmental Science*, **v7**, 1125-1133 (2014).
 80. A. A. Kharia and A. K. Singhai, Effective parameters for formulation of gastro adhesive nanoparticles: Screening by design-of-experiments approach, *Journal of Microencapsulation*, **v31**, 399-405 (2014).
 81. M. P. Jenarathanan and R. Jeyapaul, Machinability study of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites using design of experiment technique, *Pigment & Resin Technology*, **v43**, 35-44 (2014).
 82. S. Both, J. Eggersgluss *et al.*, Optimizing established processes like sugar extraction from sugar beets - Design of experiments versus physicochemical modeling, *Chemical Engineering & Technology*, **v36**, 2125-2136 (2013).
 83. M. H. Khan, M. Tariq *et al.*, Arsenic removal from drinking water with conventional and modified adsorbents: The factorial design of experiments, *Desalination and Water Treatment*, **v51**, 7304-7310 (2013).
 84. A. Ahmad, M. I. Ahmad *et al.*, A comparative study of alkaline hydrolysis of ethyl acetate using design of experiments, *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-International English Edition*, **v32**, 33-47 (2013).
 85. S. L. Fegade, B. M. Tande *et al.*, Aromatization of propylene over HZSM-5: A design of experiments (DOE) approach, *Chemical Engineering Communications*, **v200**, 1039-1056 (2013).
 86. H. Khorsand, N. Kiayee *et al.*, Optimization of amorphous silica nanoparticles synthesis from rice straw ash using design of experiments technique, *Particulate Science and Technology*, **v31**, 366-371 (2013).
 87. C. J. Aul, W. K. Metcalfe *et al.*, Ignition and kinetic modeling of methane and ethane fuel blends with oxygen: A design of experiments approach, *Combustion and Flame*, **v160**, 1153-1167 (2013).
 88. S. Suresh, V. C. Srivastava *et al.*, Removal of 4-nitrophenol from binary aqueous solution with aniline by granular activated carbon using Taguchi's design of experimental methodology, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **v47**, 284-290 (2013).

89. T. Witvrouwen, J. Dijkmans *et al.*, A design of experiments approach for the development of plasma synthesized Sn-silicate catalysts for the isomerization of glucose to fructose, *Journal of Energy Chemistry*, **v22**, 451-458 (2013).
90. R. K. Nekouei, F. Rashchi *et al.*, Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis, *Powder Technology*, **v237**, 165-171 (2013).
91. J. Kajtna and M. Krajnc, "Design of experiments" analysis in study of solventless UV crosslinkable acrylic pressure sensitive adhesives, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **v41**, 152-159 (2013).
92. T. A. Ngo, J. Kim *et al.*, Fast pyrolysis of palm kernel cake using a fluidized bed reactor: Design of experiment and characteristics of bio-oil, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **v19**, 137-143 (2013).
93. A. Rufer, A. Werner *et al.*, A study on the bifunctional isomerization of n-decane using a superior combination of design of experiments and kinetic modeling, *Chemical Engineering Science*, **v87**, 160-172 (2013).
94. H. S. Kenari, Z. Alinejad *et al.*, Effective parameters in determining cross-linked dextran microsphere characteristics: Screening by Plackett-Burman design-of-experiments, *Journal of Microencapsulation*, **v30**, 599-611 (2013).
95. N. Taghipour, J. Towfighi *et al.*, The effect of key factors on thermal catalytic cracking of naphtha over Ce-La/SAPO-34 catalyst by statistical design of experiments, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **v99**, 184-190 (2013).
96. A. Rufer and W. Reschetilowski, Application of design of experiments in heterogeneous catalysis: Using the isomerization of n-decane for a parameter screening, *Chemical Engineering Science*, **v75**, 364-375 (2012).
97. L. W. Man, P. Kumar *et al.*, Design of experiments for Malachite Green dye removal from wastewater using thermolysis - coagulation-flocculation, *Desalination and Water Treatment*, **v40**, 260-271 (2012).
98. M. Dopar, H. Kusic *et al.*, Treatment of simulated industrial wastewater by photo-Fenton process. Part I: The optimization of process parameters using design of experiments (DOE), *Chemical Engineering Journal*, **v173**, 267-279 (2011).
99. M. A. Martin, I. Gonzalez *et al.*, Optimization of coagulation-flocculation process for wastewater derived from sauce manufacturing using factorial design of experiments, *Chemical Engineering Journal*, **v172**, 771-782 (2011).
100. J. S. Thella and R. Venugopal, Modeling of iron ore pelletization using 3** ((k-p)) factorial design of experiments and polynomial surface regression methodology, *Powder Technology*, **v211**, 54-59 (2011).
101. R. N. M. Kamil, S. Yusup *et al.*, Optimization of polyol ester production by transesterification of Jatropha-based methyl ester with trimethylolpropane using Taguchi design of experiment, *Fuel*, **v90**, 2343-2345 (2011).
102. M. Poroeh-Seritan, S. Gutt *et al.*, Design of experiments for statistical modeling and multi-response optimization of nickel electroplating process, *Chemical Engineering Research & Design*, **v89**, 136-147 (2011).
103. C. Felice and D. Y. Qu, Optimization of the synthesis of nanion-montmorillonite nanocomposite membranes for fuel cell applications through statistical design-of-experiment, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **v50**, 721-727 (2011).
104. T. Mihajlovic, S. Ibric *et al.*, Application of design of experiments and multilayer perceptron neural network in optimization of the spray-drying process, *Drying Technology*, **v29**, 1638-1647 (2011).
105. K. V. Pontes, M. R. W. Maciel *et al.*, Process analysis and optimization mapping through design of experiments and its application to a polymerization process, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **v28**, 137-150 (2011).
106. H. Hua and M. A. Dube, Semi-continuous emulsion copolymerization of styrene-butyl acrylate with methacrylic acid: Box-Behnken design of experiments, *Chemical Engineering & Technology*, **v33**, 1931-1942 (2010).
107. A. Nabifar, N. T. McManus *et al.*, A sequential iterative scheme for design of experiments in complex polymerizations, *Chemical Engineering & Technology*, **v33**, 1814-1824 (2010).
108. K. S. Nascimento, P. A. J. Rosa *et al.*, Partitioning and recovery of *Canavalia brasiliensis* lectin by aqueous two-phase systems using design of experiments methodology, *Separation and Purification Technology*, **v75**, 48-54 (2010).
109. M. Muzic, K. Sertic-Bionda *et al.*, A design of experiments investigation of adsorptive desulfurization of diesel fuel, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, **v24**, 253-264 (2010).
110. A. Nabifar, N. T. McManus *et al.*, Optimal bayesian design of experiments applied to nitroxide-mediated radical polymerization, *Macromolecular Reaction Engineering*, **v4**, 387-402 (2010).
111. N. Hajjaji, V. Renaudin *et al.*, Factorial design of experiment (DOE) for parametric exergetic investigation of a steam methane reforming process for hydrogen production, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **v49**, 500-507 (2010).
112. D. Senatore, J. Laven *et al.*, Microencapsulation of epoxidized linseed oil liquid cross-linker in poly(N-vinyl-pyrrolidone): Optimization by a design-of-experiments approach, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **v49**, 3642-3653 (2010).
113. K. Keyvanloo, J. Towfighi *et al.*, Investigating the effect of key factors, their interactions and optimization of naphtha steam cracking by statistical design of experiments, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **v87**, 224-230 (2010).
114. W. S. Ling, T. C. Thian *et al.*, Process optimization studies for the dehydration of alcohol-water system by inorganic membrane based pervaporation separation using design of experiments (DOE), *Separation and Purification Technology*, **v71**, 192-199 (2010).
115. B. Royer, E. C. Lima *et al.*, Statistical design of experiments for optimization of batch adsorption conditions for removal of reactive red 194 textile dye from aqueous, *Effluents Chemical Engineering Communications*, **v197**, 775-790 (2010).

감 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 183-572, 8th ed., Wiley, New York, USA (2012).
2. G. E. P. Box, J. S. Hunter, and W. G. Hunter, *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*, 173-565, 2nd ed., Wiley, New York, USA (2005).
3. S. Bisgaard, Industrial use of statistically designed experiments: Case study references and some historical anecdotes, *J. Qual. Eng.*, **4**, 547-562 (1992).
4. T. Pravan and D. J. Street, An annotated bibliography of application papers using certain classes of fractional factorial and related designs, *J. Stat. Plann. Inference*, **106**, 245-269 (2002).
5. L. Lizarbe, M. J. Alvarez, E. Viles, and M. Tanco, Practical applications of design of experiments in the field of engineering: A bibliographical review, *Qual. Reliab. Eng. Int.*, **24**, 417-428 (2008).
6. C. F. J. Wu and M. S. Hamada, *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization*, 1-10, 2nd ed., Wiley, New York, USA (2009).
7. R. H. Myers, D. C. Montgomery, G. G. Vining, C. M. Borror, and S. M. Kowalski, Response surface methodology: A retrospective and literature survey, *J. Qual. Technol.*, **36**, 53-77 (2004).
8. T. J. Robinson, C. M. Borror, and R. H. Myers. Robust parameter design: A review, *Qual. Reliab. Eng. Int.*, **20**, 81-101 (2003).