

НЕЧІТКІ ПРОГНОСТИЧНІ МОДЕЛІ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЇ ВИТРАВНИХ ТРАФАРЕТНИХ ДРУКАРСЬКИХ ФАРБ

В.Б. Репета¹, М.Є. Дуфанець²

1. Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна <https://orcid.org/0000-0003-3204-1512> e-mail: viacheslav.b.repeta@lpnu.ua

2. Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна e-mail: maksym.y.dufanets@lpnu.ua

У статті представлено підхід до прогнозування витравної ефективності трафаретних друкарських фарб на основі методів нечіткої логіки. Для моделювання використано експериментальні дані попередніх досліджень, у яких було встановлено залежність показників кольорової різниці (ΔE) від концентрації активного агента та часу вистоювання фарбової системи. На основі цих експериментальних залежностей побудовано прогнозні моделі з використанням двох типів систем нечіткого висновку – Sugeno та Mamdani. У моделі Sugeno використано регресійні залежності, що описують експериментальні дані, тоді як модель Mamdani дозволяє представити технологічні закономірності у вигляді системи лінгвістичних правил. Побудовані нечіткі моделі забезпечують можливість прогнозування показників ΔE та ефективності для проміжних значень концентрації та часу вистоювання підготовлених фарбових композицій, що не були безпосередньо досліджені експериментально. Отримані результати демонструють узгодженість прогнозів обох підходів і підтверджують доцільність використання нечіткої логіки для аналізу та оптимізації процесу трафаретного друку витравними фарбами.

Ключові слова: трафаретний друк, текстиль, витравні фарби, нечітка логіка, прогностичне моделювання, система нечіткого висновку, оптимізація процесу, відхилення кольору.

Постановка проблеми. Трафаретний друк із застосуванням витравних фарб широко використовується у текстильному та декоративному друці завдяки можливості формувати зображення безпосередньо у структурі текстильного матеріалу шляхом хімічного видалення барвника із субстрату. На відміну від традиційних пігментних фарб, де колір формується нанесенням шаром фарбової композиції, витравні системи діють шляхом руйнування або знебарвлення барвника тканини під дією активного витравного агента. У результаті інтенсивність отриманого зображення визначається не лише параметрами друку, але й хімічною активністю фарбової системи, її складом, а також умовами підготовки та витримування фарби перед друком. Дана технологія одержання зображень на текстилі продовжує розвиватися, про що вказує прогноз зростання ринку витравних друкарських фарб у період з 2024 по 2034 роки на 7,5% [1].

Одним із основних показників ефективності процесу витравлення є колірна різниця між обробленою та необробленою ділянками матеріалу, яка характеризується параметром ΔE у системі CIE Lab [2]. Цей показник дозволяє кількісно оцінити ступінь руйнування барвника та, відповідно, ефективність витравного процесу. Водночас на значення ΔE впливає низка взаємопов'язаних факторів, зокрема концентрація активного витравного агента у фарбі, час вистоювання фарбової системи після змішування компонентів, а також особливості взаємодії фарби з матеріалом. Відповідно, нелінійний характер цих взаємозв'язків ускладнює побудову традиційних аналітичних моделей процесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз наукових публікацій за даною тематикою показує, що більшість досліджень зосереджені на експериментальному вивченні параметрів та якості процесу витравного друку на текстильних матеріалах. Зокрема, у роботі [3] досліджено вплив різних реагентів вибіркового знебарвлення на якість витравного друку на бавовняних тканинах, попередньо пофарбованих реактивними барвниками. Встановлено, що використання гідросульфід натрію забезпечує найвищі показники білизни відбитків та стійкості до стирання, що підтверджує його ефективність як відновника у даній технології. У роботі [4] розглянуто екологічні аспекти процесу витравного друку та проведено порівняльний аналіз впливу компонентного складу фарбових систем на довкілля, зокрема шляхом заміни традиційного формальдегідного відновника на діоксид тіомочевини. Експериментальні дослідження в [5] показали, що застосування оптимізованих рецептур вибіркового знебарвлення, які включають відновник Rongalite C та окисник NaClO, дозволяє отримувати контрастні декоративні візерунки з високими значеннями білизни та світлоти відбитків.

Разом з тим сучасні дослідження свідчать, що для аналізу та прогнозування складних технологічних процесів друку все частіше застосовуються методи інтелектуального моделювання. Зокрема, нечітка логіка розглядається як ефективний інструмент опису процесів, для яких характерні значна невизначеність, багатофакторність і нелінійність взаємодії параметрів. Прикладом такого підходу є робота [6], у якій запропоновано систему нечітких правил для кількісної оцінки якості флексографічних відбитків з урахуванням комплексу технологічних параметрів друкарського процесу. Подальший розвиток цього напряму представлено у роботах, присвячених моделюванню растрових перетворень та тонопередачі у друкарських системах [7], де нечіткі моделі дозволяють описувати взаємозв'язок між геометричними характеристиками растрових елементів і оптичними параметрами відбитків.

Крім того, інструменти нечіткої логіки застосовуються для прогнозування якості виробничих процесів у поліграфії, зокрема при прийнятті рішень для режимів процесу очищення флексографічних анілоксових валів [8], проектуванні мультимедійних видань [9] і післядрукарських процесів [10]. У таких моделях нечіткі системи забезпечують можливість інтегрувати експериментальні дані з експертними знаннями про процес, що дозволяє формалізувати складні технологічні взаємозв'язки та підвищити точність прогнозування якості відбитків.

Мета статті – є розроблення нечітких моделей типу Mamdani та Sugeno для прогнозування відхилення кольору ΔE у процесі витравлення при трафаретному

друці та аналіз впливу технологічних параметрів процесу на інтенсивність витравлення.

Методи досліджень.

Експериментальні дослідження процесу витравлення трафаретних фарб показали, що ефективність руйнування барвника визначається передусім двома технологічними параметрами: концентрацією активного витравного агента та часом вистоювання фарбової системи після змішування компонентів. Ці параметри формують двовимірний технологічний простір процесу, у якому кожній комбінації значень відповідає певний результат витравлення:

$$X = (x, t) \quad (1)$$

де x – концентрація витравного агента у фарбі, %

t – час вистоювання фарбової системи, хв.

Таким чином, технологічний процес можна представити у вигляді відображення, яке характеризує поведінку системи витравлення у всьому параметричному просторі:

$$F: (x, t) \rightarrow \Delta E \quad (2)$$

де ΔE – відхилення кольору між еталонною та витравленою ділянками матеріалу.

Для побудови безперервної моделі процесу та прогнозування результатів для проміжних значень параметрів використаємо нечітке моделювання. Для аналізу технологічного процесу було використано два типи нечітких систем висновку: Sugeno FIS – для кількісного прогнозування параметрів процесу; Mamdani FIS – для інтерпретації технологічних закономірностей у вигляді лінгвістичних правил [11,12].

1. Побудова моделі типу Sugeno

Нечітка модель типу Sugeno використовується для прогнозування значень показників ΔE та у безперервному просторі технологічних параметрів. У Sugeno-системі кожне правило має вигляд:

$$\text{If } (x \text{ is } A) \text{ and } (t \text{ is } B) \text{ Then } y = f(x, t) \quad (3)$$

де $f(x,t)$ – лінійна функція вхідних змінних.

У даному дослідженні функції наслідків правил задавалися у вигляді лінійних залежностей $\Delta E = a \ln(x) + b$, що відповідає експериментально встановленому логарифмічному характеру зміни ефективності витравлення залежно від концентрації активного агента.

Агрегація результатів правил у Sugeno-моделі здійснюється методом зваженого середнього [11]:

$$y = \frac{\sum w_i f_i(x, t)}{\sum w_i} \quad (4)$$

де w_i – ступінь активації відповідного правила.

2. Побудова моделі типу Mamdani

Для інтерпретації технологічних закономірностей процесу витравлення побудовано нечітку систему висновку типу Mamdani.

На відміну від Sugeno-моделі, Mamdani-система використовує лінгвістичні наслідки правил і дозволяє формалізувати експертні знання про технологічний процес.

Правила мають форму:

$$\text{If}(x = A_i) \text{AND}(t = B_j) \text{THEN}(\Delta E = C) \quad (5)$$

де A_i, B_j – нечіткі множини вхідних параметрів,
 C – нечіткі множини вихідних параметрів.

Для опису нечітких множин вхідних змінних використовувалися гаусівські функції належності:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

де c – центр функції належності,
 σ – параметр ширини функції.

Застосування гаусівських функцій забезпечує гладку апроксимацію експериментальних залежностей і плавний перехід між лінгвістичними термами[12].

Виклад основного матеріалу дослідження. Загальну схему нечіткого логічного висновку показано на рис. 1. Вхідними змінними моделі є концентрація витравного агента та час вистоювання фарбової системи. Ці параметри перетворюються у нечіткі множини за допомогою функцій належності, після чого виконуються процедури нечіткого висновку за алгоритмами Mamdani та Sugeno. Результатом моделювання є прогнозоване значення колірної різниці ΔE , що характеризує інтенсивність витравлення.

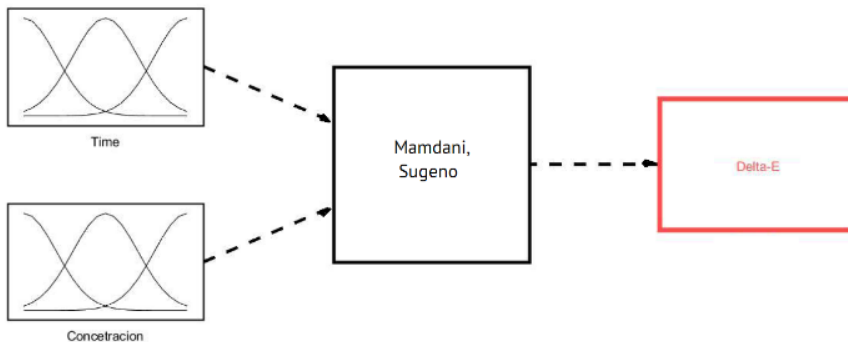


Рис. 1. Схема нечіткого логічного висновку для побудови моделей прогнозування колірної різниці ΔE за алгоритмами Mamdani та Sugeno

Враховуючи результати попередніх експериментальних досліджень [6], для побудови моделі за Sugeno використаємо наступні правила:

$$\text{If } t \text{ is «15» THEN } \Delta E = 31,979 \ln(x) + 1,8415,$$

$$\text{If } t \text{ is «240» THEN } \Delta E = 30,043 \ln(x) - 15,269.$$

У табл. 1 наведено оціночні терми для лінгвістичних змінних, які забезпечують якість процесу витравлення зображення на текстилі.

Фактори якості процесу друкування витравними фарбами

Позначення	Назва змінної	Універсальна множина	Нечіткий терм
t	Час вистоювання фарбової системи, хв	15-240	нетривалий
			проміжний
			тривалий
x	Концентрація активного агента, %	2-10	низька
			середня
			достатня

Сформуємо нечітку базу знань оцінювання параметра «Якість витравлення» за допомогою набору нечітких правил «IF - THEN»:

- IF x is «низька» AND t is «нетривалий» THEN ΔE is «середнє»
- IF x is «середня» AND t is «нетривалий» THEN ΔE is «велике»
- IF x is «достатня» AND t is «нетривалий» THEN ΔE is «велике»
- IF x is «низька» AND t is «проміжний» THEN ΔE is «мале»
- IF x is «середня» AND t is «проміжний» THEN ΔE is «середнє»
- IF x is «достатня» AND t is «проміжний» THEN ΔE is «велике»
- IF x is «низька» AND t is «тривалий» THEN ΔE is «мале»
- IF x is «середня» AND t is «тривалий» THEN ΔE is «мале»
- IF x is «достатня» AND t is «тривалий» THEN ΔE is «середнє»

За результатами аналізу і побудови функцій належності з допомогою модуля Fuzzy Logic Toolbox програмного пакету Matlab отримано моделі впливу факторів на процес витравлення (рис. 3). Залежність вихідного параметра ΔE від значення концентрації активного агента і часу вистоювання фарбової системи отримано шляхом дефазифікації за принципом «Центр ваги» [12].

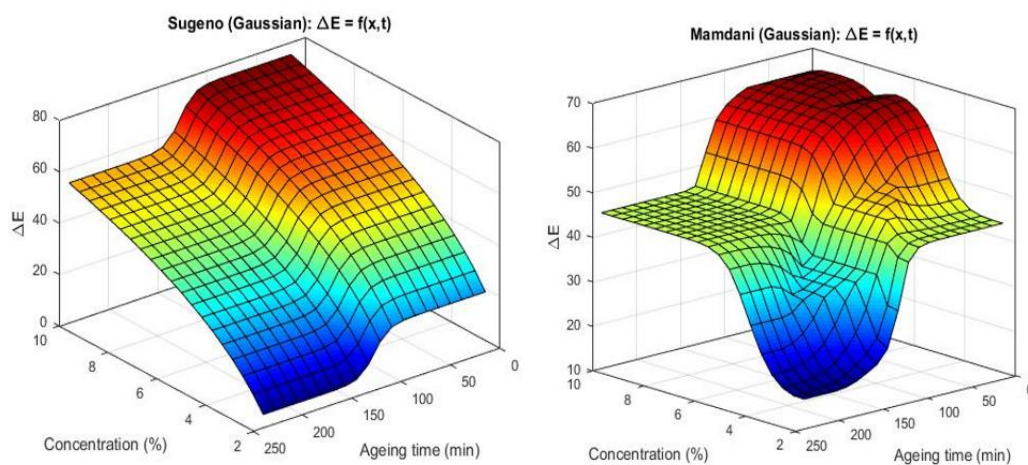


Рис. 2. Моделі впливу концентрації активного агента і часу вистоювання виготовленої фарбової витравної системи: а – за алгоритмом Sugeno; б – за алгоритмом Mamdani

Отримані тривимірні поверхні демонструють залежність кольорової відхилення ΔE від концентрації витравного агента та часу вистоювання фарбової системи. Обидві моделі відтворюють експериментально встановлену тенденцію: зі збільшенням концентрації активного агента інтенсивність витравлення зростає, що проявляється у збільшенні значення ΔE . Однак після досягнення певного рівня концентрації спостерігається ефект насичення, коли подальше збільшення концентрації не призводить до суттєвого зростання показника. Другим важливим фактором є час вистоювання фарби після змішування компонентів. Зі збільшенням часу вистоювання відбувається зниження активності витравного агента у в'язучому середовищі, що проявляється у зниженні значень ΔE . Це пов'язано з поступовими хімічними перетвореннями активних компонентів у фарбовій системі.

Таблиця 2

Прогнозування показника ΔE , отримане за двома нечіткими моделями

№	x , %	t , хв	ΔE (Sugeno)	ΔE (Mamdani)
1	2	15	23.96	44.99
2	4	15	46.00	50.22
3	6	15	58.90	66.45
4	8	15	68.05	67.02
5	6	60	58.90	65.10
6	6	120	53.71	49.90
7	6	180	38.82	44.59
8	6	240	38.81	44.78
9	10	240	54.34	44.98

У табл. 2 наведено вибіркові приклади прогнозування, отримані двома нечіткими моделями в характерних точках технологічного простору x і t . Для Sugeno-моделі спостерігається монотонне зростання ΔE зі збільшенням концентрації активного агента при малому часі вистоювання (наприклад, $x=2 \rightarrow 8\%$ за $t=15$ хв), а також зменшення ΔE зі збільшенням часу вистоювання при фіксованій концентрації (наприклад, $x=6\%$: $t=15 \rightarrow 240$ хв). Це узгоджується з технологічною інтерпретацією процесу: підвищення концентрації підсилює витравну дію, тоді як тривале вистоювання знижує реакційну активність системи. Для Mamdani-моделі прогнози мають більш “зональний” характер, що зумовлено лінгвістичною структурою правил та дефазифікацією.

Висновки. Отже, у роботі досліджено вплив концентрації витравного агента та часу вистоювання фарбової системи на ефективність процесу витравлення у трафаретному друці. На основі експериментальних даних побудовано нечіткі моделі прогнозування колірної різниці ΔE , яка використовується як інтегральний показник інтенсивності витравлення барвника у структурі матеріалу. Експериментальні результати було представлено у вигляді технологічного простору процесу, координатами якого є концентрація витравного агента x та час вистоювання фарбової системи t . Для опису залежності між технологічними параметрами та показником ΔE побудовано нечіткі моделі типу Mamdani та Sugeno, що дозволило перейти від дискретних експериментальних точок до безперервної прогнозної

функції $\Delta E = f(x, t)$. Аналіз отриманих поверхонь технологічного простору показав, що концентрація витравного агента є домінуючим фактором процесу. Зі збільшенням концентрації від 2 до 8 % при нетривалому часі вистоювання (15 хв.) прогнозоване значення колірної різниці зростає приблизно від $\Delta E \approx 24$ до $\Delta E \approx 68$, що свідчить про суттєве підвищення інтенсивності витравлення. Водночас збільшення часу вистоювання фарбової системи призводить до поступового зниження значення ΔE . Наприклад, при концентрації 6 % прогнозоване значення колірне відхилення зменшується приблизно від $\Delta E \approx 59$ при $t = 15$ хв. до $\Delta E \approx 39$ при $t = 240$ хв, що підтверджує зниження реакційної активності витравного агента внаслідок хімічних перетворень у фарбовій композиції.

Нечітка система Mamdani дозволила представити технологічні закономірності процесу витравлення у вигляді набору лінгвістичних правил та виділити характерні області технологічного простору, що відповідають різним режимам взаємодії витравного агента з барвником матеріалу. У свою чергу модель Sugeno сформувала більш гладку аналітичну апроксимацію експериментальних залежностей і забезпечила можливість безперервного прогнозування значень ΔE для будь-яких комбінацій параметрів у межах досліджуваного діапазону.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення моделі шляхом врахування додаткових факторів процесу, зокрема температури термообробки та властивостей текстильного матеріалу, що дозволить створити більш комплексні моделі прогнозування якості процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Discharge Inks In Textile Market. URL: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/discharge-inks-in-textile-market>.
2. Color Difference Formula and ΔE : CIE Standards and Color Tolerance. URL: <https://skychemi.com/color-difference-formula-delta-e/>
3. Subrata Das, Aamirah Anjum S, Devi M., Ramya K. Discharge style of printing using different discharging agents on reactive dyed cotton fabrics, *Tekstilna industrija*, 2018, may, doi: 10.13140/RG.2.2.16415.46243
4. Adel Roshdy Abd-Almoaty. Utilization of Textile Discharge Printing Principle in Creation of Artistic Patterns, *Journal of Positive School Psychology*, 2022, Vol. 6, №. 5, 317-325.
5. Seema H, Deepika L, Ambika B. A Comparative Study on Discharge Printing Using Conventional and Ecological Recipe. *Trends Textile Eng. Fashion Technol.* 3(1). 247-261.
6. Репета В. Б., Дуфанець М. Є. Дослідження процесу друкування витравними трафаретними текстильними фарбами // Поліграфія і видавнича справа. – 2025. – № 2 (90). – С. 26-33.
7. Durnyak B., Lutskiv M., Shepita P. Fuzzy Model of Raster Transformation of Square Elements. *CEUR Workshop Proceedings*, 2022, 3156, – P. 140-150.
8. Repeta V., Kukura T., Kukura Y., Myklushka I., Durnyak B. Assessment and prognostic models of the efficiency of anilox rollers cleaning process // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2025. – Vol. 3899 : *Proceedings of the 1st International workshop on advanced applied information technologies with CEUR-WS*, Khmelnytskyi, Ukraine, Zilina, Slovakia, December 5, 2024. – P. 35–44.
9. Senkivskyy V., Babichev S., Pikh I., Kudriashova A., Senkivska N., Kalynii I. Forecasting the reader's demand level based on factors of interest in the book. In *Proceedings of the CIT-*

Risk'2021: *2nd International Workshop on Computational & Information Technologies for Risk-Informed Systems*, Kherson, Ukraine, 16-17 September 2021, pp. 176-191. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3101/Paper12.pdf>.

10. Durnyak B., Senkivskyy, V.Pikh, I., Kudriashova A. Modelling of Post-printing Processes and Book Interest Level. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2024, 219, 3-27.

11. Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/types-of-fuzzy-inference-systems.html>

12. Zadeh L. Decision-Making in Fuzzy Environment, *Management Science*, 1970, vol. 17, № 4, pp. 141-160.

REFERENCES

1. Discharge Inks In Textile Market. URL: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/discharge-inks-in-textile-market>.

2. Color Difference Formula and ΔE : CIE Standards and Color Tolerance. URL: <https://skychemi.com/color-difference-formula-delta-e/>

3. Subrata Das. Aamirah Anjum S, Devi M., Ramya K. (2018). Discharge style of printing using different discharging agents on reactive dyed cotton fabrics, *Tekstilna industrija*, DOI: 10.13140/RG.2.2.16415.46243

4. Adel Roshdy Abd-Almoaty (2022). Utilization of Textile Discharge Printing Principle in Creation of Artistic Patterns, *Journal of Positive School Psychology*, 2022, Vol. 6, №. 5, 317-325.

5. Seema H, Deepika L, Ambika B. (2018) A Comparative Study on Discharge Printing Using Conventional and Ecological Recipe. *Trends Textile Eng. Fashion Technol.* 3(1). 247-261.

6. Repeta V. B., Dufanets M. E. (2025). Research into the printing process with etching screen textile inks, *Printing and publishing*. – 2025. – № 2 (90). – C. 26-33.

7. Durnyak B., Lutskiv M., Shepita P. (2022) Fuzzy Model of Raster Transformation of Square Elements. *CEUR Workshop Proceedings*, 3156, – P. 140-150.

8. Repeta V., Kukura T., Kukura Y., Myklushka I., Durnyak B. (2024) Assessment and prognostic models of the efficiency of anilox rollers cleaning process // *CEUR Workshop Proceedings*. Vol. 3899 : *Proceedings of the 1st International workshop on advanced applied information technologies with CEUR-WS*, Khmelnytskyi, Ukraine, Zilina, Slovakia, December 5. – P. 35–44.

9. Senkivskyy V., Babichev S., Pikh I., Kudriashova A., Senkivska N., Kalynii I. (2021) Forecasting the reader's demand level based on factors of interest in the book. In *Proceedings of the CIT-Risk'2021: 2nd International Workshop on Computational & Information Technologies for Risk-Informed Systems*, Kherson, Ukraine, 16-17 September 2021, pp. 176-191. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3101/Paper12.pdf>.

10. Durnyak B., Senkivskyy, V.Pikh, I., Kudriashova A. (2024) Modelling of Post-printing Processes and Book Interest Level. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 219, 3-27.

11. Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/types-of-fuzzy-inference-systems.html>

12. Zadeh L. (1970) Decision-Making in Fuzzy Environment, *Management Science*, Vol. 17, № 4, pp. 141-160.

FUZZY PREDICTIVE MODELS OF THE EFFICIENCY OF ACTIVITY OF DISCHARGE SCREEN PRINTING INKS

V.B. Repeta¹, M.Ye. Dufanets²

1. Lviv Polytechnic National University 12, Stepana Bandery, St., Lviv, 79013, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3204-1512> e-mail: viacheslav.b.repeta@lpnu.ua

2. Lviv Polytechnic National University 12, Stepana Bandery, St., Lviv, 79013, Ukraine
e-mail: maksym.y.dufanets@lpnu.ua

The article presents a predictive modelling framework for evaluating the etching efficiency of printing inks based on fuzzy logic methods. The research investigates the influence of the concentration of an active etching agent and the ageing time of the ink system on the colour difference (ΔE). Experimental data obtained for concentrations in the range of 2-10% and ageing times corresponding to fresh and aged ink states were used to construct predictive models. Two fuzzy inference approaches were applied. A Sugeno-type fuzzy model was developed to provide quantitative predictions of ΔE and efficiency using logarithmic regression functions derived from the experimental data. In parallel, a Mamdani fuzzy inference system was constructed to describe the technological behaviour of the process in terms of interpretable linguistic rules. The comparison of both models demonstrated consistent trends and confirmed that the maximum etching efficiency is achieved at concentrations close to 6%, while further increase in concentration leads to saturation of the effect. In addition, prolonged ageing of the ink reduces the etching ability due to degradation of the active component in the binder medium. The proposed fuzzy predictive framework provides a useful tool for analysing and optimizing etching processes in printing ink systems and can be applied for technological control and formulation optimization in printing production..

Keywords: screen printing, textiles, discharge inks, fuzzy logic, predictive modeling, fuzzy inference system, process optimization, color difference.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2026

Received 09.03.2026

Стаття прийнята 21.05.2026

Accepted 21.05.2026

Опубліковано 30.05.2026

Published 30.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons CC-BY 4.0

© В.Б. Репета, М.Є. Дуфанець