

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра інжинірингу
машинобудівних технологій

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичної роботи

на тему:

**“МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ПІД
ТИСКОМ В СЕРЕДОВИЩІ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ
SOLIDWORKS PLASTICS”**

з дисципліни

“САРМ і САЕ системи машинобудівних виробництв”

для практичних занять та самостійної роботи
здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
а також дистанційного навчання

для спеціальності 131 «Прикладна механіка»
та блоку вибіркових дисциплін інших спеціальностей

Тернопіль, 2023

Методичні вказівки розроблені відповідно до освітньої програми та навчального плану підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

Укладачі: д.т.н., проф. Василь ВАСИЛЬКІВ
к.т.н., доц. Лариса ДАНИЛЬЧЕНКО
к.т.н., доц. Дмитро РАДИК
аспірант Владислав ПАРАЩУК

Рецензент: Роман ЗОЛОТИЙ

Відповідальний за випуск: к.т.н., доц. Дмитро РАДИК

Методичні вказівки розглянуті та схвалені на засіданні кафедри інжинірингу машинобудівних технологій.

Протокол № 2 від 12.10.2023 р.

Методичні вказівки рекомендовано до друку науково-методичною комісією ФМТ.

Протокол № 2 від 26.10.2023 р.

1. МЕТА РОБОТИ

Набуття практичних навичок з моделювання процесу лиття полімерних деталей під тиском у прес-форму в середовищі програмного продукту SolidWorks Plastics, визначення місць розміщення та кількості литників для реалізації такого процесу, виявлення причин появи та усунення можливих дефектів, визначення оптимальних режимів роботи для підвищення якості виконання виробу.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

2.1 Загальне поняття про технологію лиття під тиском

У сучасному машинобудуванні понад третину від загального обсягу полімерних деталей виготовляється методом лиття під тиском у форми на термопластавтоматах – спеціальних ливарних машинах поршневого або гвинтового типу, що подають розплав полімеру під великим тиском (80-140 МПа) у прес-форму. Загалом, особливість такого методу формування виробів полягає в розм'якшенні полімерного матеріалу до в'язкотекучого стану і наступному переміщенні його під тиском у замкнену ливарну форму, де такий матеріал змінює свою температуру та твердіє і набуває конфігурацію внутрішньої порожнини форми.

Поетапність реалізації згаданої технології здійснюється таким чином (рис. 1). Підготовлений розплав полімеру розміщений у циліндрі ливарної машини ($l = \text{nom}$) до подальшої подачі в ливарну форму (рис. 1, *a*). Потім, циліндр змикається із вузлом форми, а пластикатор осьовим рухом із швидкістю $V_{\text{ос}}$ переміщує розплав в ливарну форму (рис. 1, *б*). В результаті осьового руху черв'яка форма заповнюється розплавом полімерного матеріалу, пластикатор зміщується в крайнє ліве положення (рис. 1, *в*, $l = 0$). Далі розплав в прес-формі застигає та утворює твердий виріб (рис. 1, *г*). Циліндр продовжує залишатися в зімкнутому із системою форми положенні. В цей момент черв'як починає обертатися із $\omega_{\text{ч}} = \text{nom}$, готує та транспортує розплав у передню зону матеріального циліндра та при цьому відсувається назад. Після накопичення необхідного обсягу розплаву (відстань $l = \text{nom}$)

обертання черв'яка припиняється ($\omega_{\text{ч}} = 0$). Він займає вихідне положення. Після завершення процесу тверднення пластмаси форма розмикається, та виріб видаляється із неї (рис. 1, *д*). Для полегшення знімання виробу згаданий циліндр може до цього моменту відсунутися від вузла форми. Потім цикл лиття під тиском повторюють.

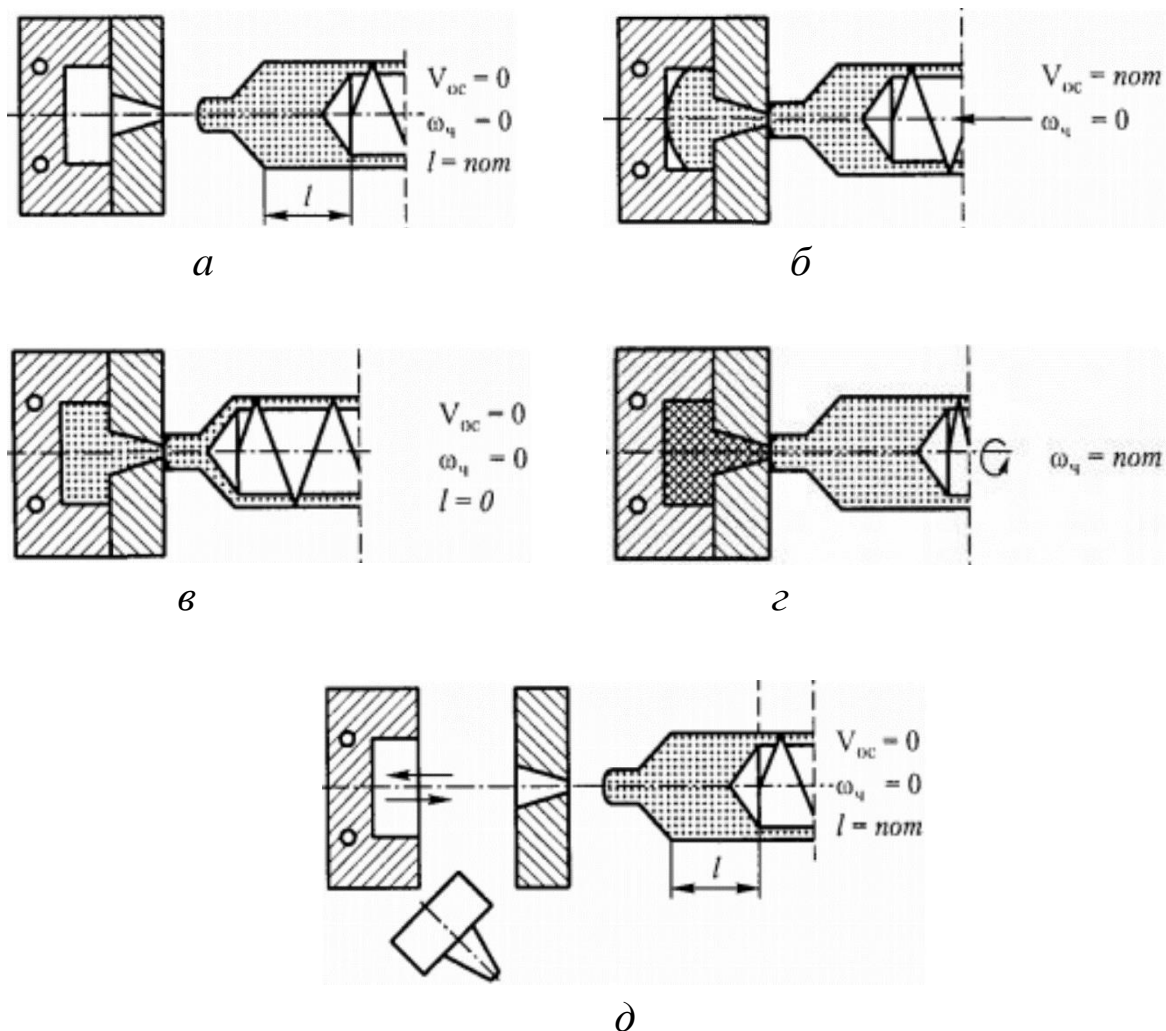


Рисунок 1 – Основні етапи процесу лиття під тиском

Найважливішим етапом у даному технологічному процесі є відпрацювання виливків на технологічність – аналіз якості та можливості заповнення прес-форми, пошук та усунення ліній холодних спаїв, доопрацювання вихідної моделі з метою усунення можливих усадок.

Сьогодні подібні завдання вирішують на етапі проєктування моделі з використанням розрахункових CAE/CAE/CAM-систем для моделювання процесів ливарного формування.

2.2 Модуль програмного аналізу SolidWorks Plastics

Однією із систем дослідження процесів лиття є SolidWorks Plastics, що входить до складу програмного комплексу SolidWorks.

Основними функціональними можливостями такого програмного продукту є моделювання, аналіз та оптимізація пролиття прес-форм з урахуванням фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів, зокрема особливостей заливання матеріалу, руху потоку матеріалу, процесу тверднення матеріалу, теплових процесів, теплових напружень, часу охолодження; визначення місць холодного спаю, розподілу полів температур і тиску; розрахунки залишкових зусиль зімкнення прес-форми, визначення дефектів деталі (викривлення, її деформацій), залишкових напружень та урахування усадки згідно лінійної моделі; встановлення розподілу полів температури моделі. Усе це здійснюється на основі бібліотеки термопластів для лиття та матеріалів прес-форм.

Важливим першочерговим інструментом SolidWorks Plastics є можливість моделювання та оптимізації розташування необхідної кількості литників. Завдяки цьому, інженер може точно визначити оптимальне місце заливання майбутньої деталі. В результаті цього отримують готову модель прес-форми з розрахованими параметрами лиття щодо конкретної деталі без необхідності виготовлення прес-форми, що значно знижує собівартість отримання виробу.

2.3 Вихідні дані для моделювання та аналізу процесу лиття під тиском

Об'єктом аналізу SolidWorks Plastics є попередньо спроектована деталь згідно технічного завдання наданого інженеру-проектанту.

Програмний комплекс SolidWorks дозволяє працювати з різними форматами тривимірної геометрії. Зокрема для виконання розрахунків можна використовувати моделі, імпортовані з інших CAD-систем (Solid Edge, Blender CAD, OpenSCAD, GraphiteOne CAD, LibreCAD, KiCAD ZCAD, Techne CAD/CAM, JustCAD, CopyCAD, NanoCAD, A9CAD, eCabinet, gCAD3d, Minos CAD, Wings 3D CAD, Heeks CAD/CAM, Alibre, TurboCAD та ін.).

Як приклад наведемо модель деталі «Гвинт» (рис. 2), яка призначена для закріплення полістирольних, пінопластових плит у системах теплоізоляції. Її розміри зображені на рис. 3.

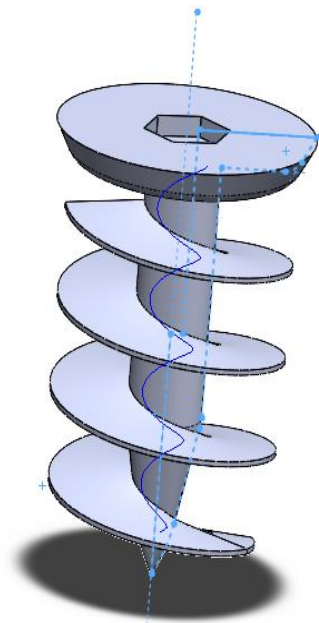


Рисунок 2 – 3D модель деталі «Гвинт»

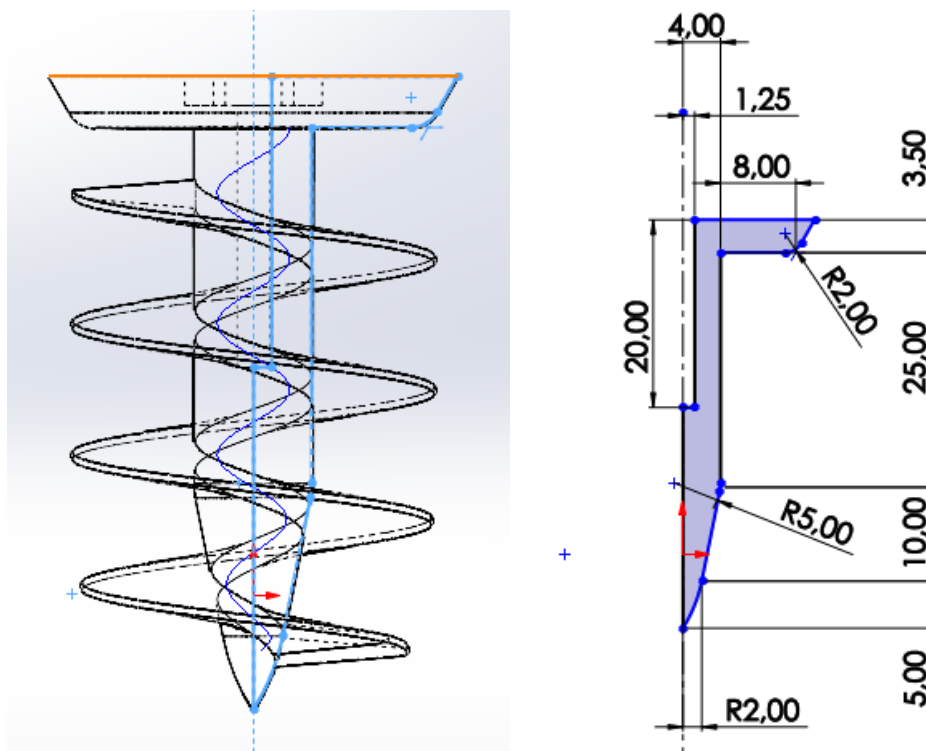


Рисунок 3 – Ескіз деталі «Гвинт»

Різьбова частина деталі утворена гелікоїдом, профіль поперечного перерізу витка якого зображений на рис. 4.

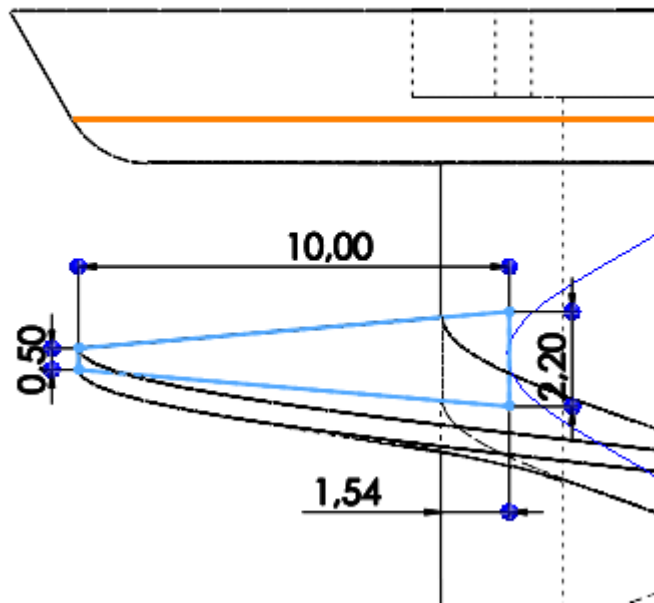


Рисунок 4 – Поперечний переріз витка різі у деталі «Гвинт»

2.4 Основні етапи підготовки даних, моделювання та аналізу процесу лиття деталі

Задля початку аналізу засобами SolidWorks Plastics необхідно перемкнутись на вкладку проектування на «SolidWorks Plastics» та «дерево» процесів згідно рис. 5.

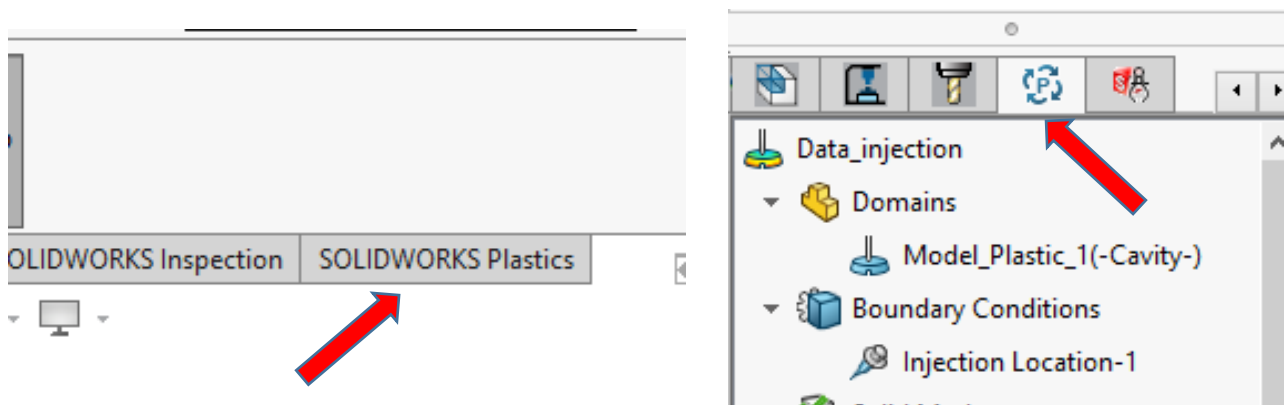


Рисунок 5 – Вкладка та «дерево» процесів інструменту «SolidWorks Plastics»

У разі відсутності даної панелі потрібно ввімкнути розширення «SolidWorks Plastics» за шляхом вказаним на рис. 6, адже за замовчуванням ввімкнено лише стандартні інструменти.

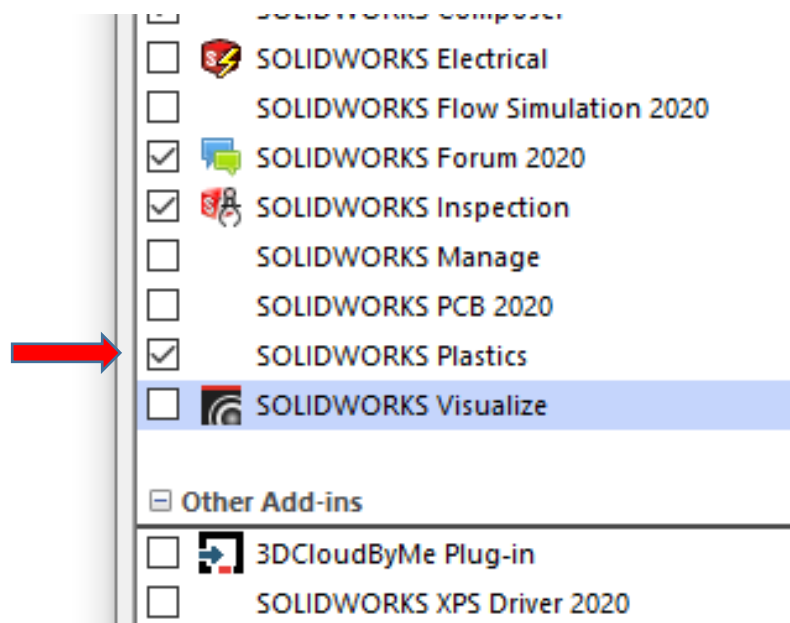
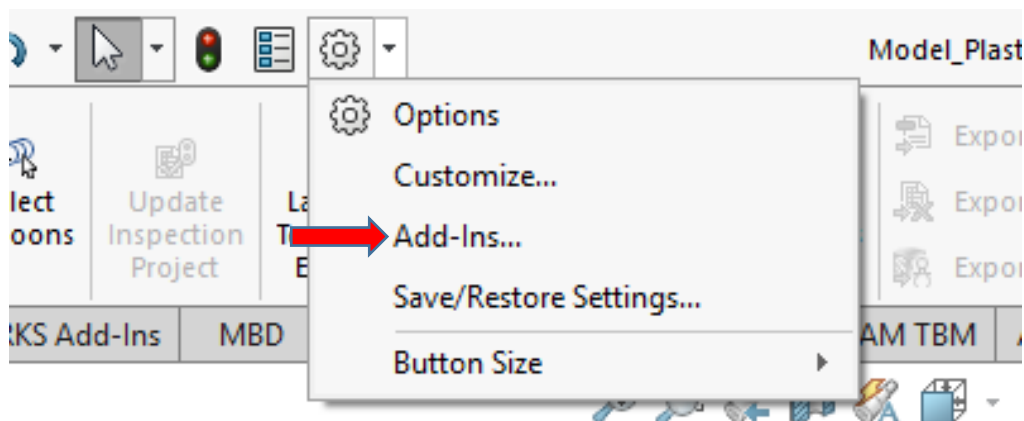


Рисунок 6 – Вкладка активації інструменту «SolidWorks Plastics»

Задля початку аналізу необхідно створити нове дослідження, для цього необхідно натиснути «New Study» після чого відкриється вікно створення нового аналізу, де необхідно задати нове ім'я аналізу та натиснути «ОК».

Наступним етапом є створення сітки кінцевих елементів вихідної моделі деталі за допомогою опції «Create Mesh».

Необхідно відзначити, що SolidWorks Plastics дозволяє застосовувати два методи розбиття геометрії: поверхневий та об'ємний.

У поверхневому методі для створення розрахункової сітки застосовуються зовнішні та внутрішні грані деталі.

Такий метод характеризується спрощеною структурою сітки та великою швидкістю аналізу прес-форми. Недоліком його є нижча точність розрахунку у порівнянні з 3D-сіткою. Тому сфера застосування поверхневого методу це тонкостінні деталі, в яких немає великих перепадів товщин стінок. Також поверхневий метод часто використовується при укрупненому аналізі геометрії деталі, коли необхідно попередньо оцінити можливість виготовлення методом лиття під тиском.

Для більш складних деталей, а також для виконання фінальних розрахунків застосовується метод розбиття геометрії деталі, який використовує весь об'єм твердого тіла під час побудови сітки кінцевих елементів. При значно більших витратах ресурсів комп'ютера моделювання процесу заповнення прес-форми із застосуванням цього дає максимально точні результати. Розбиття геометрії деталі при такому методі може відбуватися з використанням елемента сітки тетраєдрів або гексаєдрів.

У даному випадку після активації опції «Create Mesh» у відкритому вікні задаємо дискретність поверхні, що аналізується за допомогою повзунка «Surface Mesh». Після цього натискаємо «ОК».

Наступним кроком є вибір матеріалу лиття шляхом подвійного натискання на вкладку «Polymer» у дереві процесів (рис. 7).

Програмний продукт SolidWorks Plastics містить велику базу даних марок полімерів, яка охоплює щонайменше 5 тис. найменувань пластмас від різних виробників з різними характеристиками.

У процесі вибору будь-якого з полімерів у діалоговому вікні відображається детальна характеристика обраного матеріалу, зокрема стандартні параметри максимальної та мінімальної необхідної температури лиття та прес-форми, густину матеріалу в залежності від температури, теплопровідність тощо. У такому меню вибираємо необхідний тип пластику. У прикладі обрано матеріал марки ABS. Це термопластична ударостійка технічна смола, сополімер акрилонітрил-бутадієн-стирол.

Потім ми підтверджуємо вибір, натиснувши «ОК».

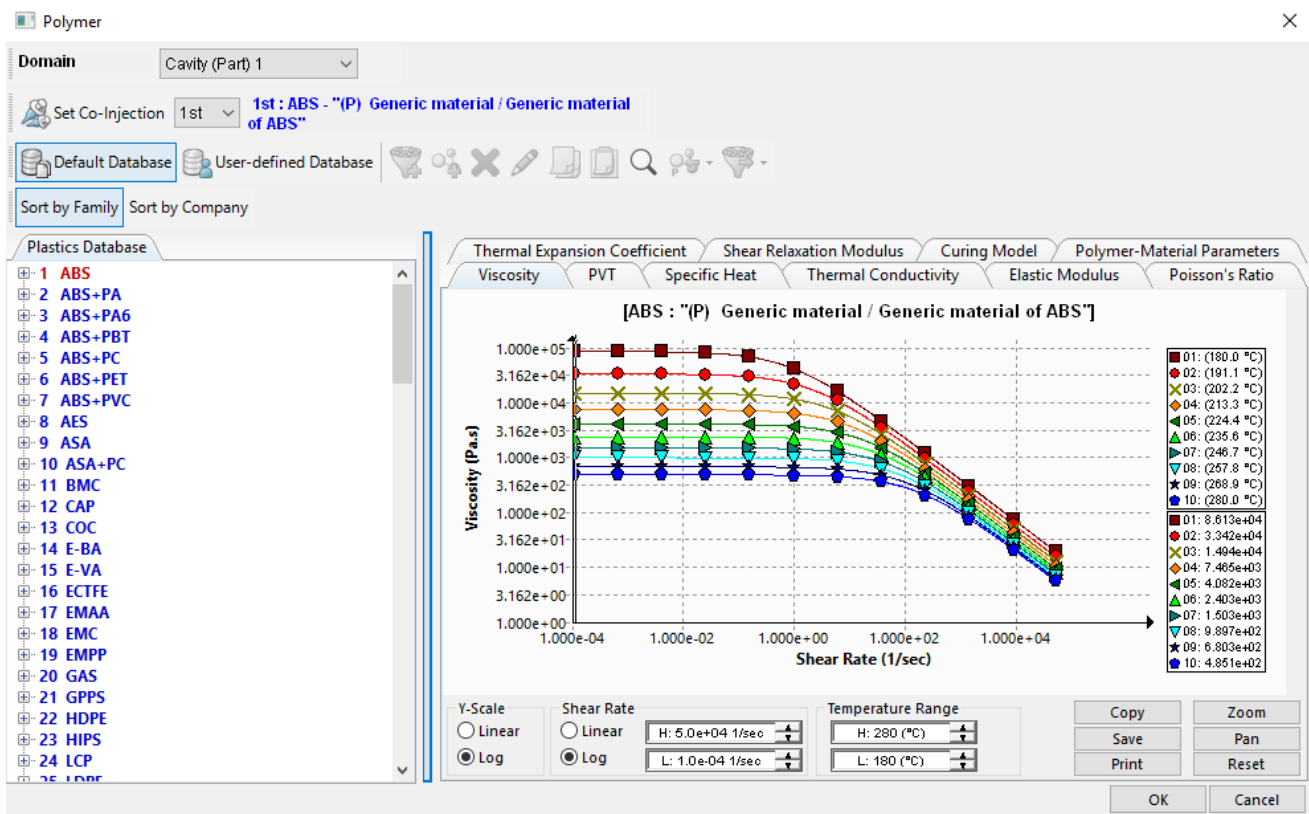


Рисунок 7 – Меню вибору полімеру для майбутньої деталі

Наступним важливим параметром є матеріал прес-форми. У залежності від обраного матеріалу буде змінюватись у першу чергу швидкість вистигання та тверднення деталі та довговічність прес-форми. Інструмент SolidWorks Plastics дозволяє також розрахувати швидкості вистигання деталі та прес-форми з зовнішнім охолодженням. Для прикладу залишено даний параметр стандартним – без додаткового охолодження. Для відкриття меню вибору матеріалу прес-форми натиснемо двічі на меню «Mold» у дереві процесів (рис. 8).

У меню можна обрати матеріал ливарної прес-форми згідно з технічним завданням, можливістю виготовлення та необхідною зносостійкістю.

У даному випадку матеріалом прес-форми нами обрано сталь AISI 420 Stainless Steel (SS), що позиційована у списку бази даних під номером 126. Це мартенситна нержавіюча сталь, яка зміцнюється термообробкою і має високу зносостійкість.

Після вибору матеріалу потрібно підтвердити вибір, натиснувши «OK».

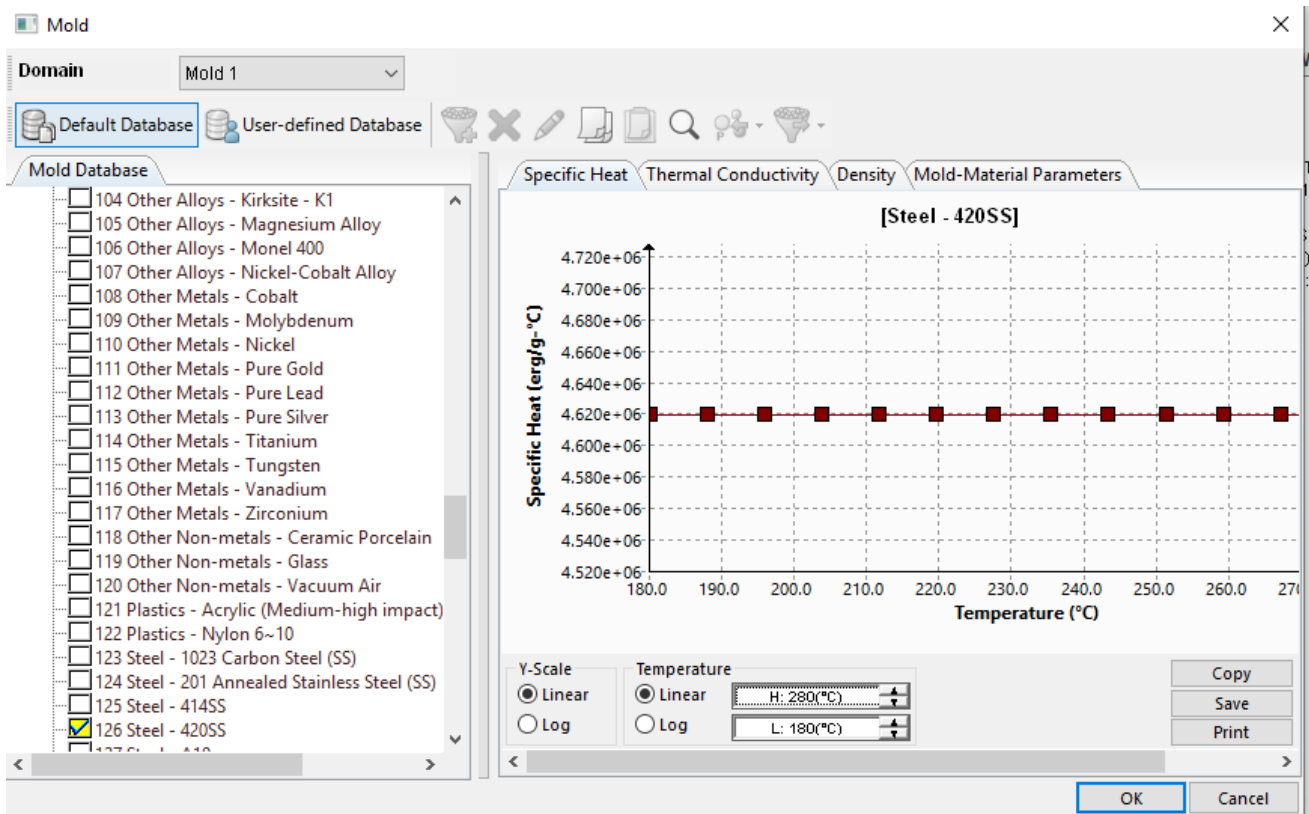


Рисунок 8 – Меню вибору матеріалу прес-форми

Наступним етапом є визначення граничних умов моделювання та місць (кількість литників), де буде здійснюватися упорскування розплавленого полімеру. Граничні умови представлені широким набором параметрів, більшість із яких за умовчанням призначається автоматично з інформації з баз даних верстата і полімеру.

Для задання місця вприскування необхідно натиснути правою клявішою миші на вкладку «Boundary Conditions» дерева процесів та обрати пункт «Injection Location».

У меню вибору місця та кількості литників у параметрі - «Type» можна обрати тип вибору локації литника за площиною («Geometry Face»), або за точкою («Point»). У полі «Selection» вказується обране місце розташування литника за попередньо обраним типом його встановлення. У полі «Pointer Diameter» вказується діаметр литника. За необхідності змінюють інші параметри у даному меню. Після обрання всіх необхідних параметрів підтверджуємо вибір, натиснувши на піктограму ✓.

На даному етапі введено усі необхідні параметри для аналізу процесу лиття обраного полімерного матеріалу під тиском у прес-форму при стандартних налаштуваннях процесу лиття. У разі

необхідності зміни параметрів процесу лиття змінюють налаштування у вкладці «Process Parameters» (рис. 9).

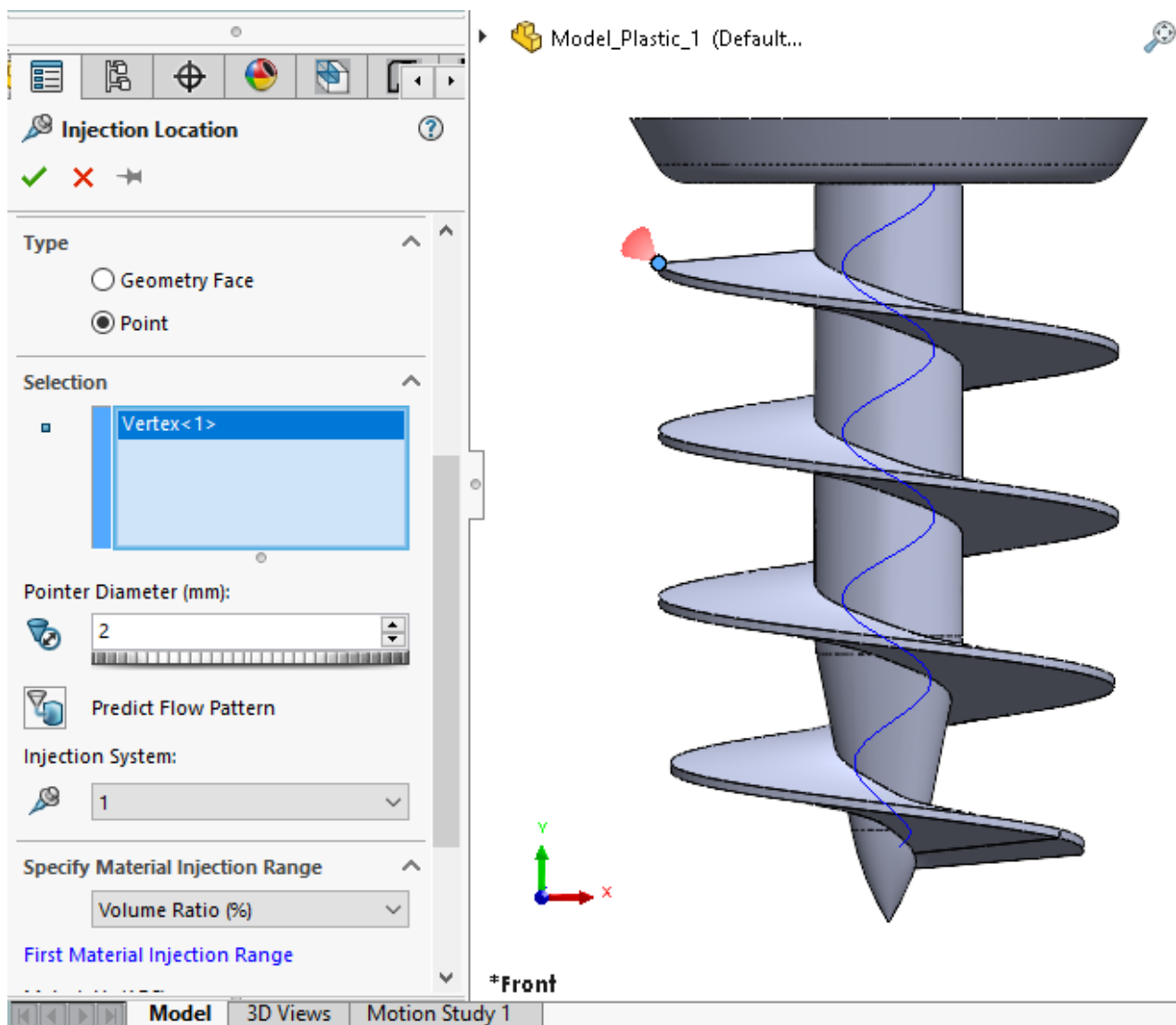


Рисунок 9 – Меню вибору місця розміщення та кількості литників

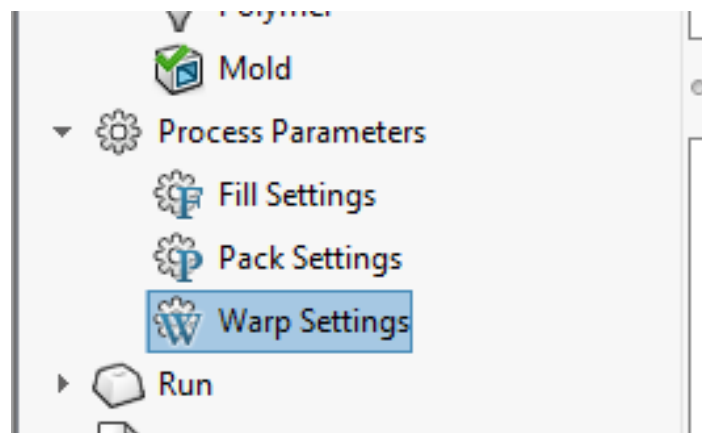


Рисунок 10 – Вкладка зміни стандартних налаштувань процесу лиття

У вкладці «Process Parameters» необхідно задати такі параметри, як: температура лиття термопласту, температура прес-форми, максимальний тиск впорскування термопласту, сила зімкнення прес-форми, час витримування, температура навколишнього середовища та інші.

Задавши всі параметри активуємо вкладку «Run» з дерева процесів та обираємо тип аналізу «Flow + Pack + Warp».

Після аналізу отримаємо детальний звіт включаючи час впорскування (рис. 11), об'єм, вагу, необхідний тиск впорскування для оптимального заповнення прес-форми (рис. 12), швидкість

вистигання при заданих параметрах, пролітність форми (у разі неможливості виготовити якісну деталь при заданих параметрах, програма сповістить про це відповідним сповіщенням (рис. 13)) та інші важливі параметри.

Згідно з отриманою візуалізацією (рис. 9) час впорскування деталі «Гвинт» для заданих параметрів становить 3.1801 с. Такий час є достатньо великим, щоб утворились непролиті частини, або знизилась якість отриманої деталі. Також очевидно, що більшість деталі було пролито за першу половину часу впорскування, а не рівномірно розподілено по часу, що свідчить про невірну обрані параметри лиття.

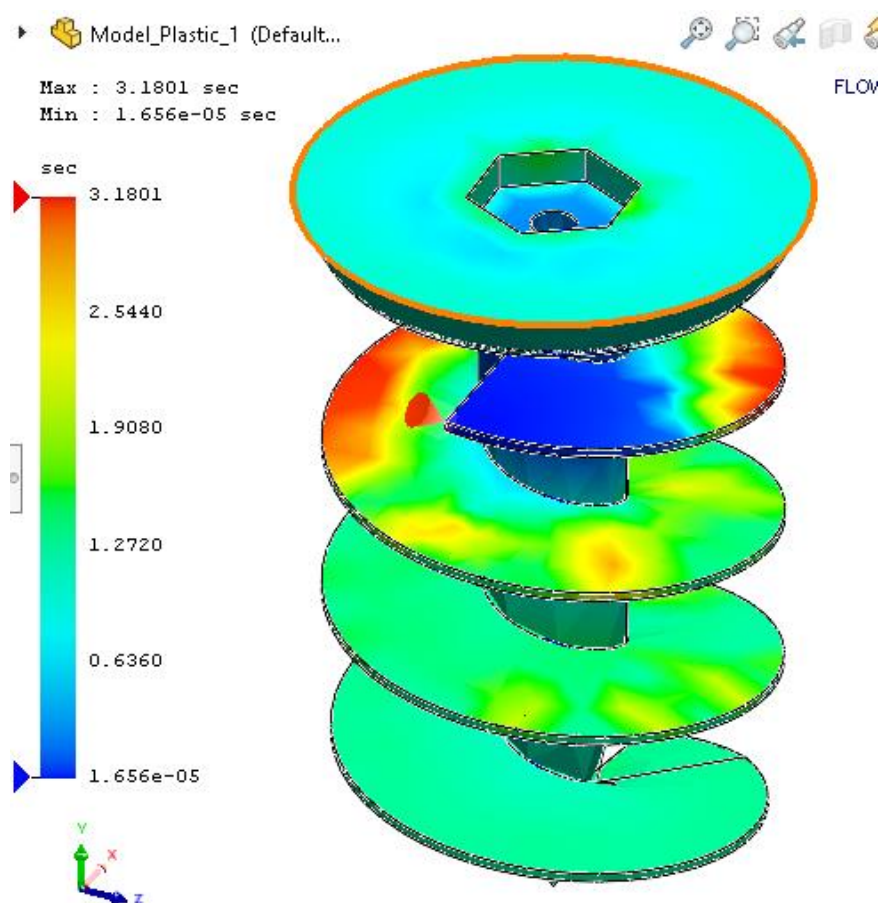


Рисунок 11 – Візуалізація процесу лиття від часу

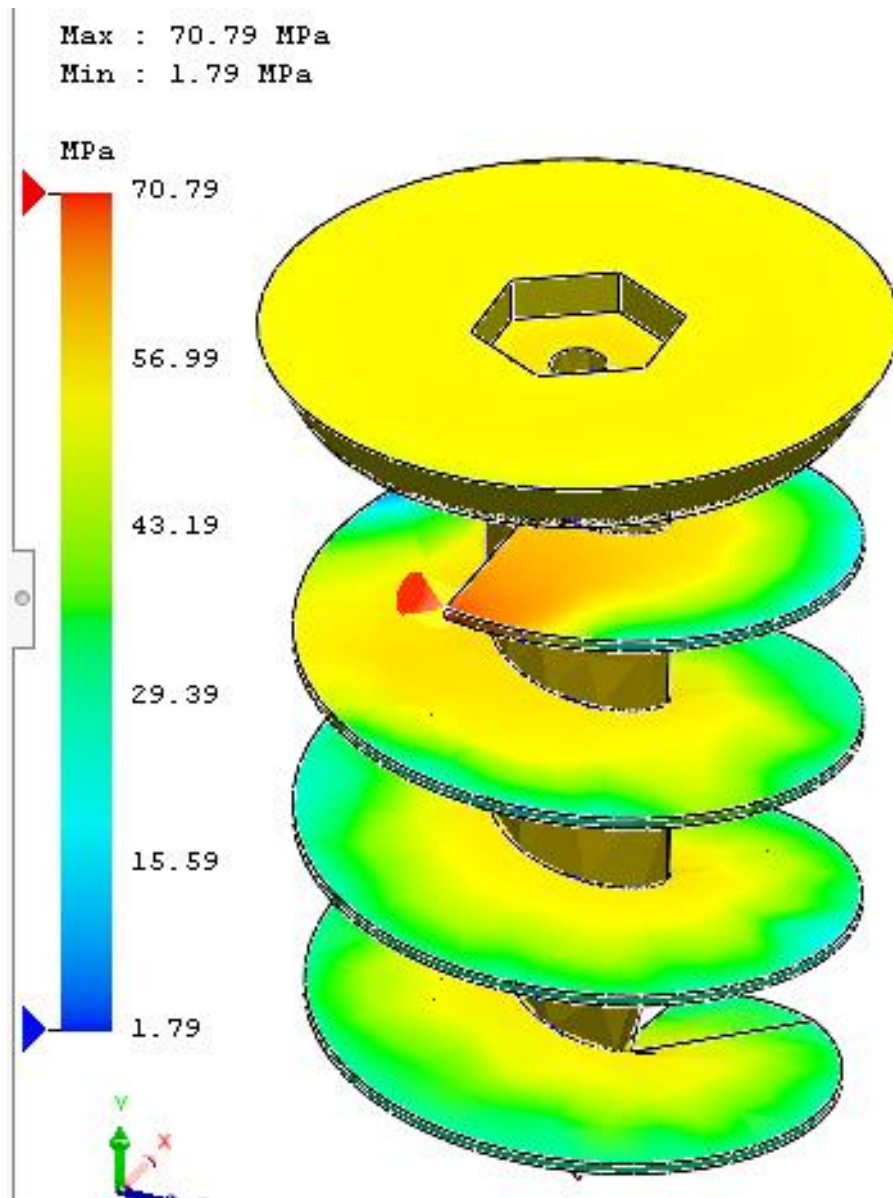


Рисунок 12 – Візуалізація необхідного тиску для пролиття кожної з ділянок

Як бачимо з візуалізації необхідного тиску для пролиття кожної з ділянок (рис. 12) тиск впорскування для якісного пролиття деталі при заданих параметрах складе 70.79 МПа, а це занадто велика величина для такої деталі, про що свідчить повідомлення SolidWorks Plastics (рис. 13).

Adviser: 

This part can be successfully filled with an injection pressure of 70.8 MPa (10268.84 psi). The injection pressure required to fill is greater than 66% but less than 90% of the maximum injection pressure limit specified for this analysis.

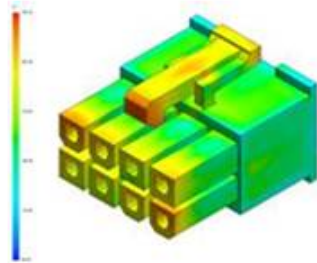
The required injection pressure is still within a reasonable range, 70.79% of the maximum injection pressure limit, however, if there will be additional pressure losses through the mold runner system and along the length of the injection molding machine, you should take measures to reduce the pressure required to fill. These include increasing part, runner and gate thickness, increasing mold and melt temperatures, or changing to a lower viscosity plastic.

Since the Maximum Temperature at End of Fill has remained within 10 deg C of the starting melt temperature, there is little to no risk of plastics material degradation.

Temperature at End of Fill:

At the end of fill, the plastic in contact with the cavity wall freezes into a very thin frozen layer that has cooled down to the temperature of the mold. The thickness of this frozen layer is independent of the thickness of the part wall. The thickness is dependent on the melt and mold temperature differential and the material thermal conductivity.

On the outer surface of the part, the Temperature at End of Fill result displays temperature values taken from the center of the solid mesh cell nearest to the surface. Since this location is slightly inside the part, temperatures will be higher than the mold wall temperature. This difference will decrease as you create a finer solid mesh with more cells through the thickness of the part.



View of Temperature at End of Fill (uniform Mold Wall Temperature = 50 °C)


[To change the melt temperature:](#)

Рисунок 13 – Сповідання про можливу необхідність у зміні параметрів лиття

Враховуючи вище зазначений звіт SolidWorks Plastics, очевидно, що параметри обрані невірні.

Змінивши місце розташування литника (рис. 14) отримано значно кращі результати лиття. Деталь пролита більш рівномірно, за час у 1.3530 с.

Відповідно до візуалізації (рис. 15) при зміні лише локації литника вдалось зменшити тиск впорскування з 70.79 МПа до 30.73 МПа, що перевищує подвійне зниження тиску лиття термопласту. Разом з зниженням тиску пролиття стало більш рівномірним.

▶  Model_Plastic_1 (Default...

Max : 1.3530 sec

Min : 0.0189 sec

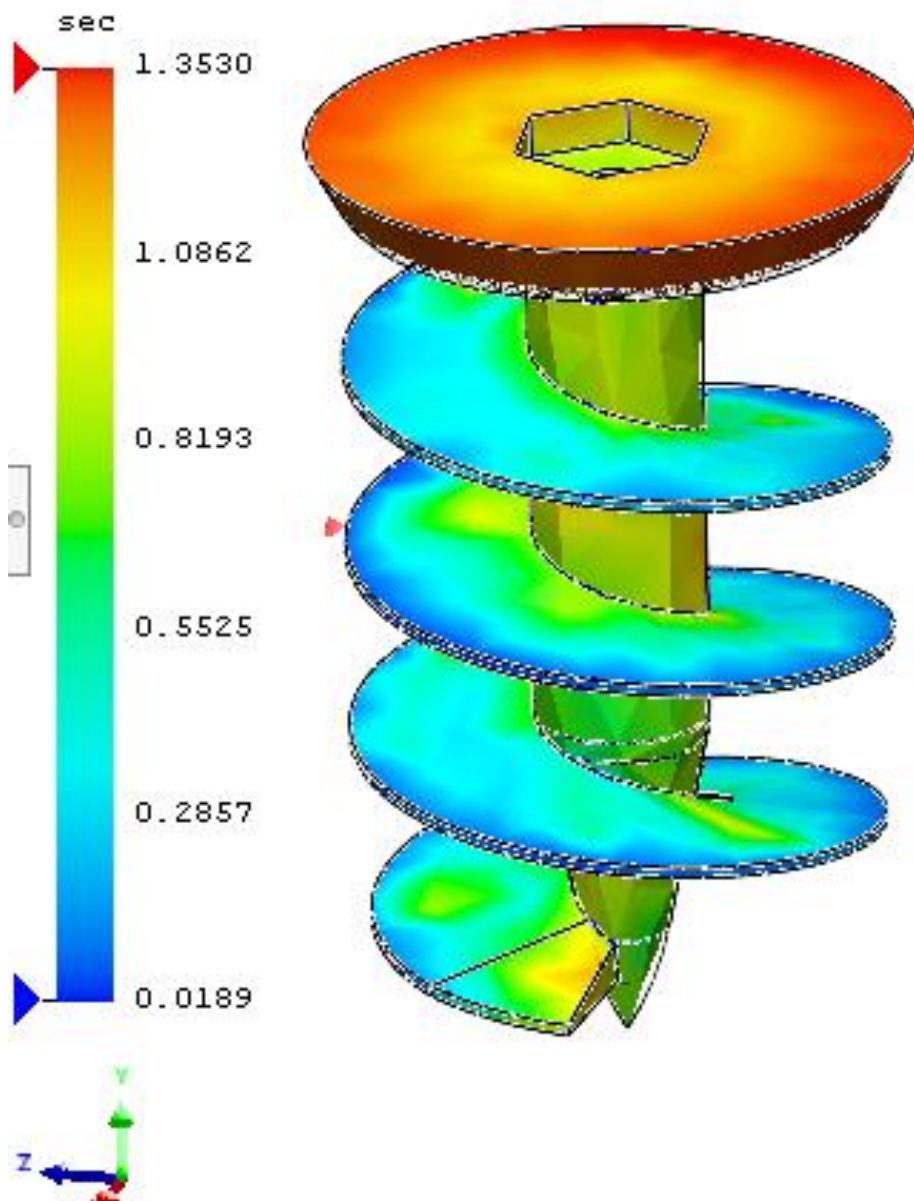



Рисунок 14 – Візуалізація процесу лиття від часу зі зміною локації литника

У кінці аналізу програма позитивно оцінила внесені зміни змінивши колір «світлофору» з жовто на зелений колір. Проте дані параметри неможливо вважати найкращими, але вони достатні для якісного виробництва деталі. За потреби можливо провести аналіз з безліччю варіацій окремо обраних параметрів, віднайшовши максимально ефективні для конкретної моделі деталі.

▶  Model_Plastic_1 (Default...

Max : 30.73 MPa

Min : 0.10 MPa

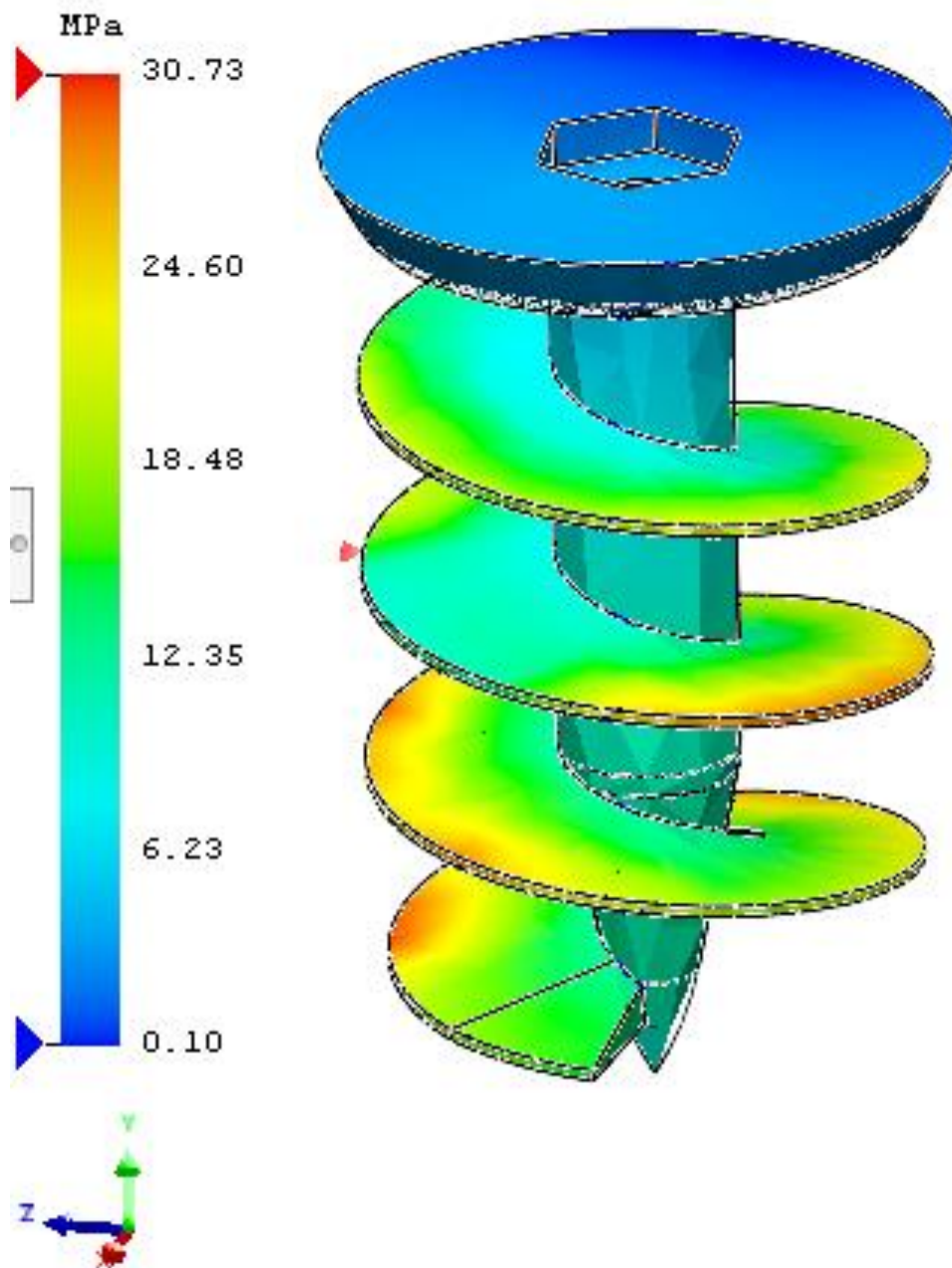


Рисунок 15 – Візуалізація необхідного тиску для пролиття кожної з ділянок зі зміною локації литника

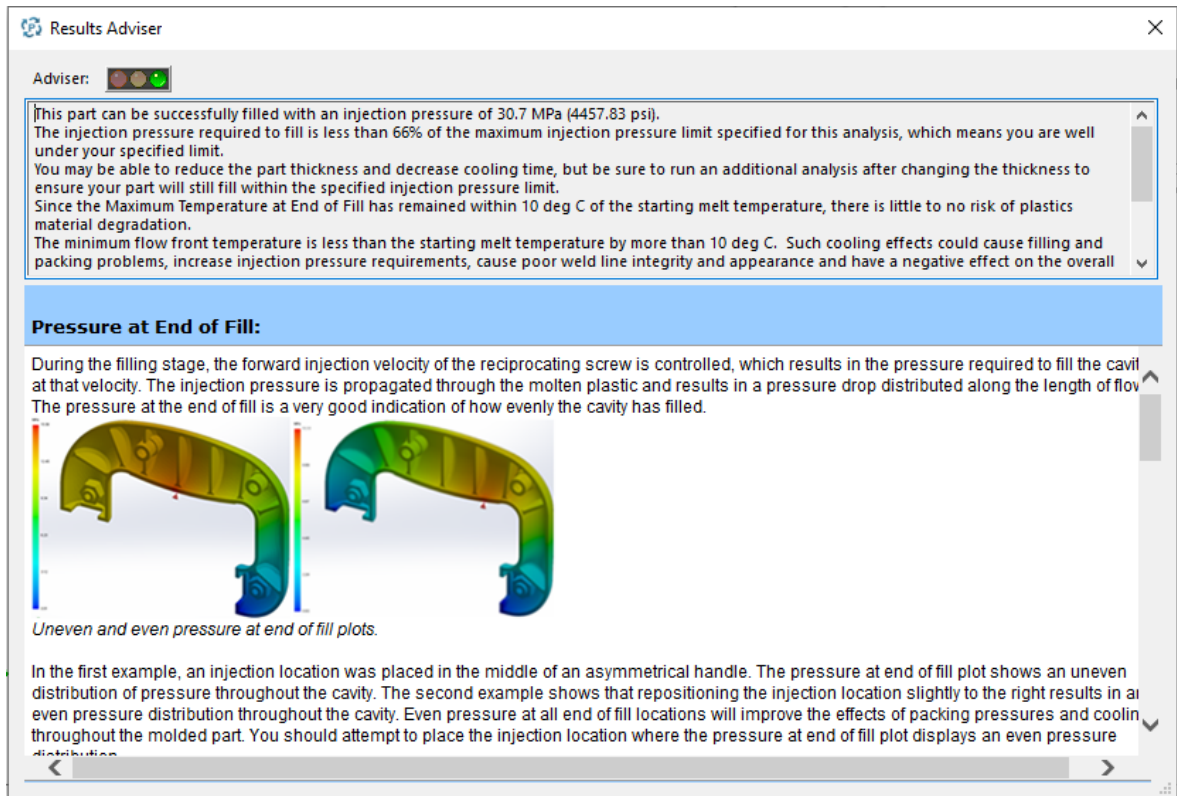


Рисунок 16 – Повідомлення про можливу необхідність зміни параметрів лиття шляхом зміни локації литника

Після усіх потрібних змін у параметрах SolidWorks Plastics дає можливість створити деталізований звіт про проведені дослідження та задані при цьому параметри (див. додаток А). Для цього необхідно натиснути «Summary and Report» у вкладці «Results» (рис. 17) дерева процесів. Після чого необхідно заповнити відповідні дані слідуючи відповідним підказкам.

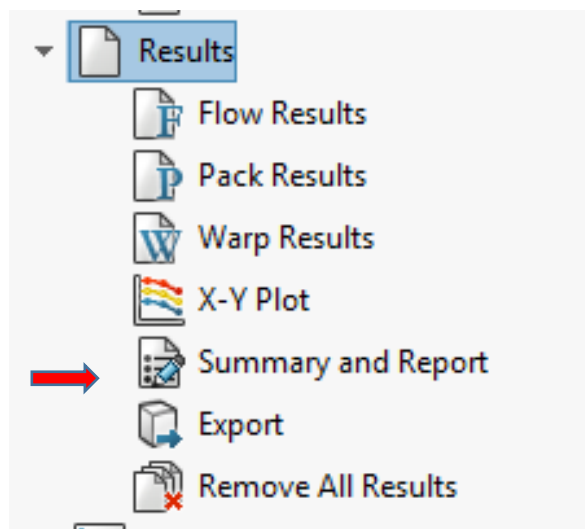


Рисунок 17 – Зображення вкладки «Results»

Завдяки такому інструменту як SolidWorks Plastics можна провести максимально детальний аналіз виготовлення деталі методом лиття термопласту під тиском у прес-форму термопластавтомату, не затрачаючи кошти на виготовлення тимчасових прес-форм для оцінки якості лиття, що дозволяє суттєво знизити вартість розробки та впровадження у виробництво нових затребуваних деталей конструкцій.

2.5 Програмне забезпечення для виконання роботи

SolidWorks Education Edition — програмний комплекс SolidWorks, призначений для забезпечення навчального процесу в навчальних закладах. Надається мережева ліцензія місткістю до 60 учбових місць. Він містить модуль SolidWorks Plastics.

SolidWorks Student Engineering Kit SolidWorks Student Engineering Kit (SEK) — студентська (домашня) ліцензія SolidWorks Premium, версії SolidWorks Simulation Premium, SolidWorks Flow Simulation призначені для використання студентами і викладачами в домашніх умовах.

SolidWorks Campus – університетський пакет навчальних ліцензій SolidWorks для одноразового оснащення ліцензійним програмним забезпеченням усіх підрозділів навчального закладу. Надаються безстрокові мережеві ліцензії SolidWorks на 200, 500 і 1000 учбових місць. Включає усі функції SolidWorks School Edition, а також додаткові опції по використанню SolidWorks в домашніх умовах: запозичення ліцензій на строк до 300 днів, студентські і домашні ліцензії SolidWorks.

Модуль SolidWorks Plastics може бути виконаний у трьох варіантах: SolidWorks Plastics Standard, SolidWorks Plastics Professional, SolidWorks Plastics Premium.

Отримати програмний продукт можна в [офіційного дистриб'ютора в Україні, Молдові та Грузії – компанії SOFTICO](https://solidworks.softico.ua/) (<https://solidworks.softico.ua/>).

3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА СТРУКТУРА ЗВІТУ

1. Здійснити побудову 3D моделі деталі згідно обраного варіанту із таблиці 1 завдань для виконання практичної роботи.

2. Виконати усі необхідні дії для моделювання та аналізу процесу лиття під тиском в середовищі програмного продукту SolidWorks Plastics.

3. Зробити звіт. Він виконується за зразком файлу звіту, згенерованого програмним продуктом SolidWorks Plastics. Приклад такого звіту наведено у додатку А.

4. Отриманий файл необхідно надіслати у скриньку звітності щодо виконання індивідуальних практичних робіт з дисципліни “САМ та САЕ системи машинобудівних виробництв” (ID5425).

4. ЗАВДАННЯ НА ПРАКТИЧНУ РОБОТУ

Варіанти індивідуальних завдань подані у табл. 1 і 2.

Завданням для практичної роботи також можуть бути вихідні матеріали для виконання студентом курсового та дипломного проектування, практичні задачі згідно замовлень стейкхолдерів та ін. В окремих випадках, згідно індивідуального завдання викладача, практична робота може мати пошуковий, дослідницький характер та не виконуватись за жорстким описом (сценарієм).

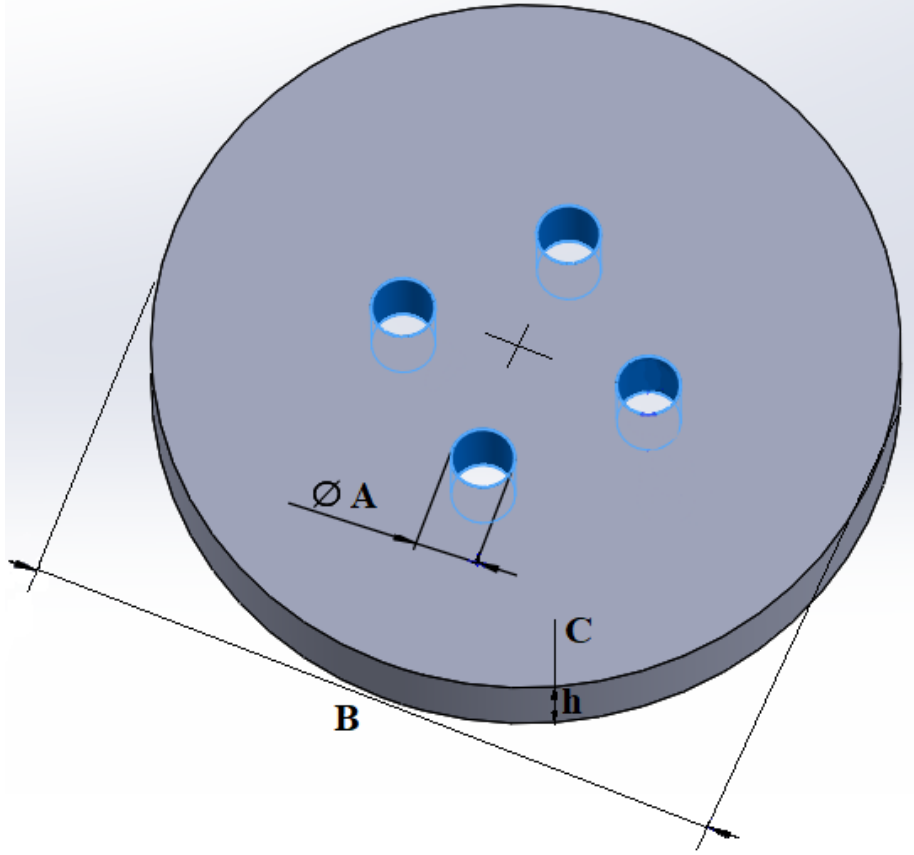
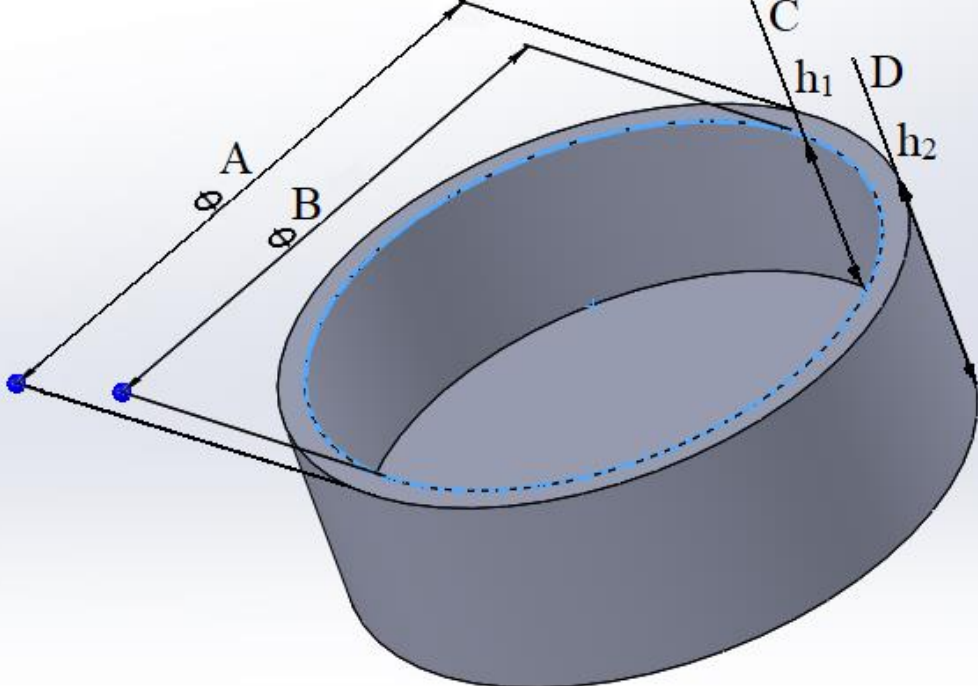
Таблиця 1 – Варіанти завдань

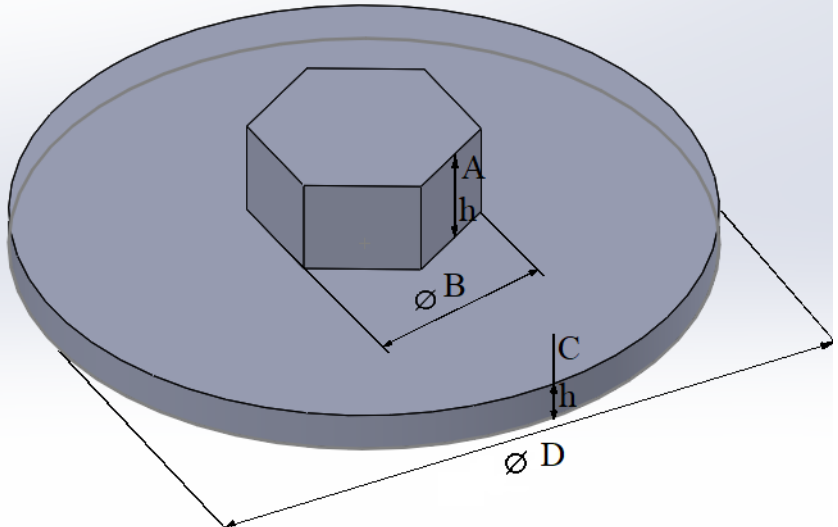
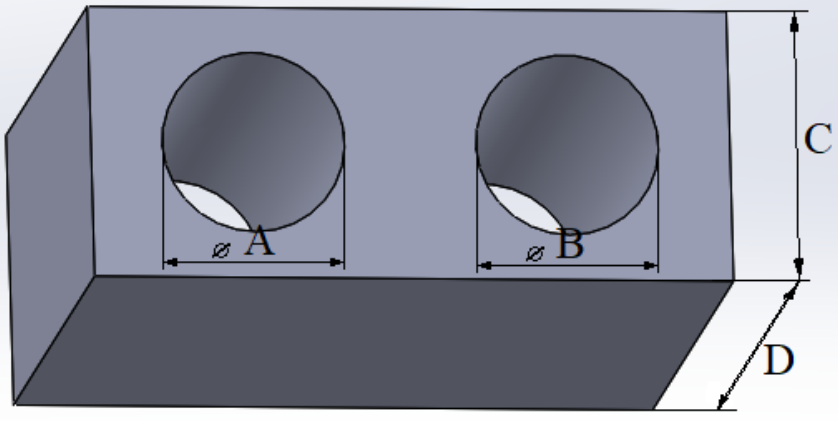
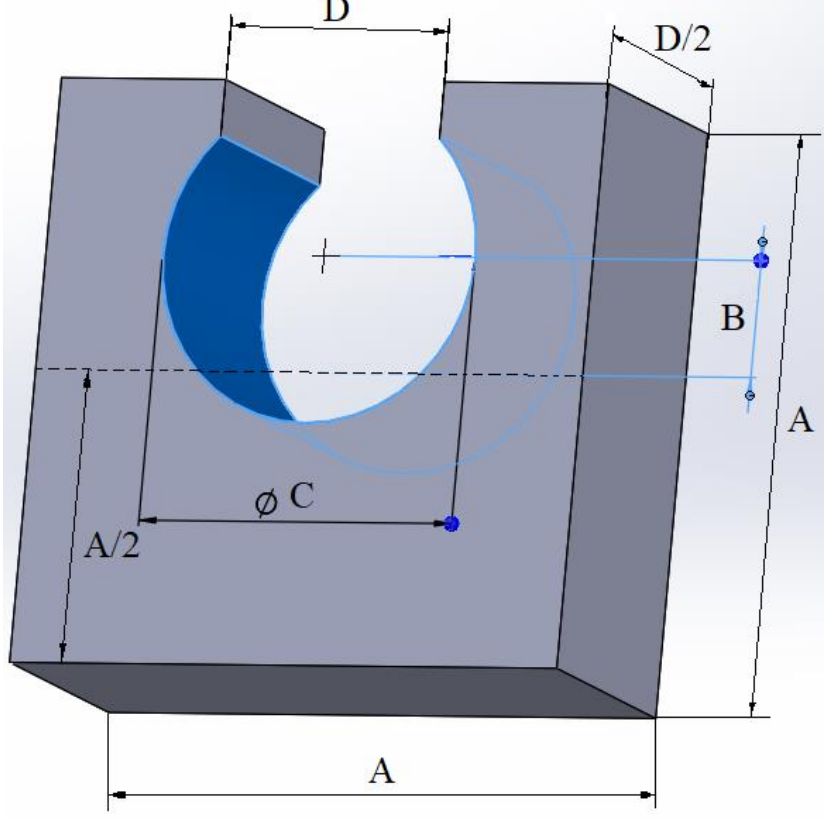
№ з/п	№ деталі	Розміри деталі, мм				Матеріал виготовлення деталі	Матеріал прес-форми
		A	B	C	D		
1	1	3	35	5	–	ABS	Steel – 420SS
2	1	4	40	6	–	PET	Aluminium Alloys -2014-T6
3	1	3	45	6	–	PP	Steel – 420SS
4	1	4	50	5	–	HIPS	Aluminium Alloys -2014-T6

Закінчення таблиці 1

№ з/п	№ деталі	Розміри деталі, мм				Матеріал виготовлення деталі	Матеріал прес-форми
		A	B	C	D		
5	2	40	38	10	12	HIPS	Steel – 420SS
6	2	42	40	8	12	ABS	Aluminium Alloys -2014-T6
7	2	44	38	14	15	PET	Steel – 420SS
8	2	46	42	14	16	PP	Aluminium Alloys -2014-T6
9	3	5	5	3	40	HIPS	Steel – 420SS
10	3	6	6	4	35	PLA	Aluminium Alloys -2014-T6
11	3	5	7	5	45	ABS	Steel – 420SS
12	3	6	8	6	40	PET	Aluminium Alloys -2014-T6
13	4	4	4	6	5	PP	Steel – 420SS
14	4	5	5	8	8	HIPS	Aluminium Alloys -2014-T6
15	4	6	6	8	10	PLA	Steel – 420SS
16	4	8	8	10	12	ABS	Aluminium Alloys -2014-T6
17	5	40	5	20	18	PET	Steel – 420SS
18	5	42	6	25	20	PP	Aluminium Alloys -2014-T6
19	5	35	5	25	20	HIPS	Steel – 420SS
20	5	50	7	30	25	PLA	Aluminium Alloys -2014-T6
21	6	60	12	35	30	ABS	Aluminium Alloys -2014-T6
22	6	70	16	45	40	PET	Steel – 420SS

Таблиця 2 – 3D моделі деталей

№ деталі	Зображення деталі
1	<p style="text-align: center;">2</p>  <p>A 3D perspective view of a circular plate. The plate has a diameter labeled B and a thickness labeled h. There are four circular holes on the top surface, each with a diameter labeled $\varnothing A$. The holes are arranged in a square pattern around the center. The distance from the center of the plate to the center of one hole is labeled C. A crosshair symbol is located at the center of the plate.</p>
2	 <p>A 3D perspective view of a truncated cone. The top diameter is labeled $\varnothing A$ and the bottom diameter is labeled $\varnothing B$. The total height is labeled C. A dashed blue line is drawn on the top surface, and the height from the top edge to this line is labeled h_1. The height from the top edge to the bottom edge is labeled h_2. A point D is marked on the top surface near the dashed line.</p>

1	2
3	
4	
5	

5. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Назвіть основні процеси, що проходять під час лиття термопласту під тиском у прес-форму.
2. Що являє собою продукт SolidWorks?
3. Що являє собою інструмент SolidWorks Plastics продукту SolidWorks?
4. Що необхідно для проведення аналізу процесу лиття використовуючи інструмент SolidWorks?
5. Основні етапи проведення аналізу процесу лиття за використання інструмент SolidWorks.

6. ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ

1. Комп'ютерне моделювання багатотільних моделей [Електронний ресурс]: конспект лекцій для здобувачів освітнього ступеня бакалавр спеціальності: 163 «Біомедична інженерія» всіх форм навчання / уклад.: Ю. Г. Сагіров. – Маріуполь: ПДТУ, 2019. – 104 с. URL: <https://events.pstu.edu/bioart/wp-content/uploads/sites/3/2020/04/computer-multi-body-design-lekcziyi-skorochno.pdf>
2. Vasylykiv, V., Pylypets, M., Danylchenko, L., Radyk, D. (2021) Formalized description and synthesis of schemes for shaping helical flights and auger billets based on the componentic methods. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 104, no 4, pp. 44–57.
3. Терміни та визначення в технічній творчості та наукових дослідженнях. Методичний посібник / Укладачі: Пилипець М.І, Васильків В.В., Радик Д.Л. – Тернопіль: Вид.-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2011. – 294 с.
4. Експериментальні дослідження в технології машинобудування. Навчальний посібник з дисципліни "Наукові дослідження і теорія експерименту". Уклад. Васильків В.В., Радик Д.Л. – Тернопіль: Вид.-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2012. – 256 с.

5. Васильків, В.В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.08 / Василь Васильович Васильків; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів, 2015. – 312 с.

6. Масан, В. О. Моделювання процесу лиття під тиском для тонкостінних деталей: магістерська робота: 131 "Прикладна механіка" / В. О. Масан; керівник роботи С. В. Бойко; НУ «Чернігівська політехніка». – Чернігів, 2021. – 75 с. URL:

https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27699/1/Simonchuk_magistr.pdf

7. David C. Planchard SolidWorks 2018 Quick Start with Video Instruction. – Published on: 2018 CSWP

8. SolidWorks Plastic-моделирование процессов литья под давлением в среде SolidWorks. URL:

https://www.youtube.com/watch?v=Dl_5O4oIEM0

9. Gordon J., Total Quality Process Control for Injection Molding. Second Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2012. 824p.

10. Zafar K. Trouble Shooting in Plastic Injection Molding Machines. New Jersey: New Jersey Institute of Technology, 1993. 171 p.

11. Design and manufacturing of plastic injection mould [online] [accessed 2023-03-27]. URL:

<http://old.bgk.uni-obuda.hu/ggyt/targyak/seged/bagimlennb/imw.pdf>.

12. Tremblay T. Injection Moulding Part Design For Dummies, Proto Labs Special Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2012. 66 p.

13. Mariya Konsulova-Bakalova Application of SolidWorks Plastic in the Training in Mechanical Engineering. Annual Journal [online]. 2017. Vol. 1. No. 1. URL: <https://doi.org/10.29114/ajtuv.vol1.iss1.37>.

14. Injection Molding Simulation Analysis of a Computer Exhaust Fan Using SolidWorks® Plastics [online] [accessed 2023-03-27]. URL:

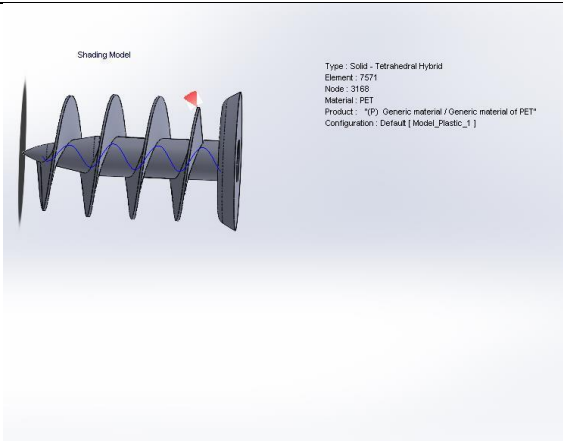
https://www.academia.edu/10394782/Injection_Molding_Simulation_and_Analysis_using_SolidWorks_TM_Plastics_for_a_Computer_Exhaust_Fan.

15. Injection Molding: Definition, Construction, Working Process, Advantages, Application [online] [accessed 2023-03-27]. URL:

<https://themechanicalengineering.com/injection-molding/>.

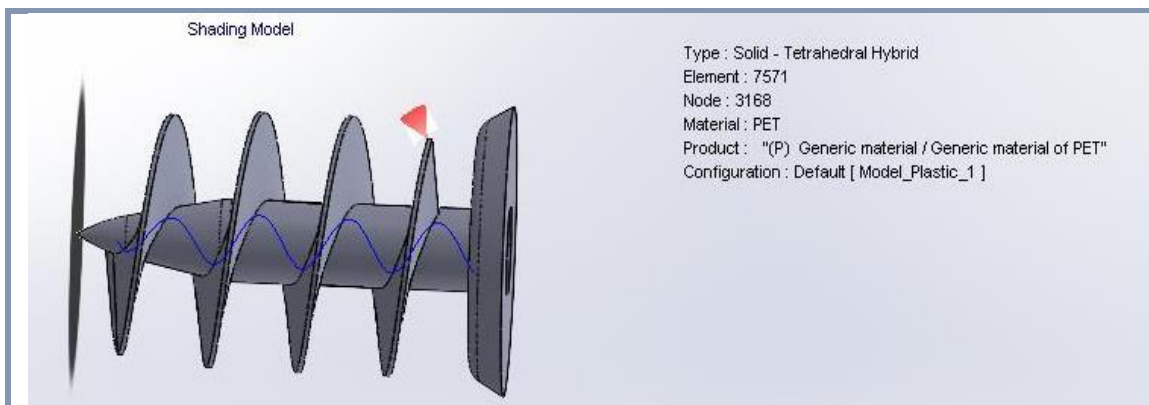
16. What Is Plastic Injection Molding [online] [accessed 2023-03-27]. URL: http://help.solidworks.com/2021/English/swplastics/c_plastic_injection_molding.htm.
17. Sullyfaizura Mohd Rawi, Suzilawati Alias, Siti Aishah Wahid Design and development mini compression molding for teaching and learning. Education and Social Sciences Review [online]. 2020, 1(2), p. 48-53. URL: <https://doi.org/10.2921/07essr57300>
18. Mikell P. Groover Fundamentals of modern manufacturing: Materials, Processes, and Systems, John Wiley & Sons, Inc., 4th Edition [online] [accessed 2023-03-27]. 2002, p. 1028. ISBN-10: 0470467002, ISBN-13: 978-0470467008. URL: <https://www.fcusd.org/cms/lib/CA01001934/Centricity/Domain/4529/Fundamentals%20of%20Modern%20Manufacturing%20Materials%20%20Processes%20and%20Systems%20%204th%20Edition.pdf>
19. САМ і САЕ системи машинобудівних виробництв. Сторінка навчальної дисципліни на сервері дистанційного навчання ТНТУ. URL: <https://dl.tntu.edu.ua/login.php?course=5425>

Додаток А. Приклад звіту про результати аналізу процесу лиття деталі під тиском за допомогою інструменту SolidWorks

	<h2>Process of filling PET Part</h2> <p>Date: 29.07.2022 Designer: Vladyslav Parashchuk Analysis: Solid/ Full Solid Model</p> <h3>Table of Contents</h3> <p>Introduction Помилка! Закладку не визначено. Model Information 27 Material Properties 28 Process Parameters 30 Flow Results 30 X-Y Plot35 Conclusion: 38</p>
---	--

Model Information

Comments:



Name: Model_Plastic_1
 Current Configuration: Default

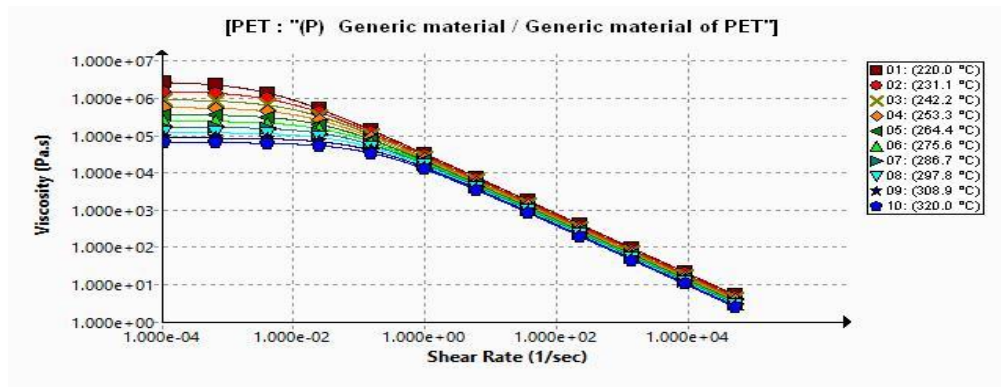
Name	Default
Type	Solid
Element	7571
Node	3168
Symmetry Face	No
Volume	4.72 (cm3)
Mass	7.80 (G)
Size	27.92 (mm) x 43.50 (mm) x 27.99 (mm)

Material Properties

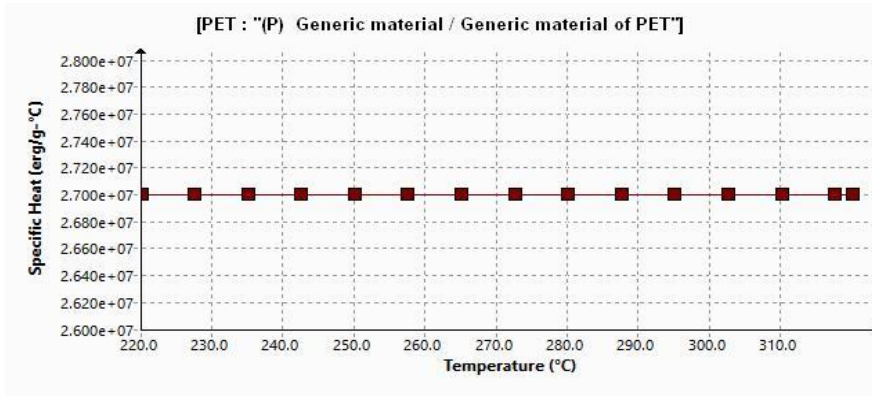
Comments:

Polymer

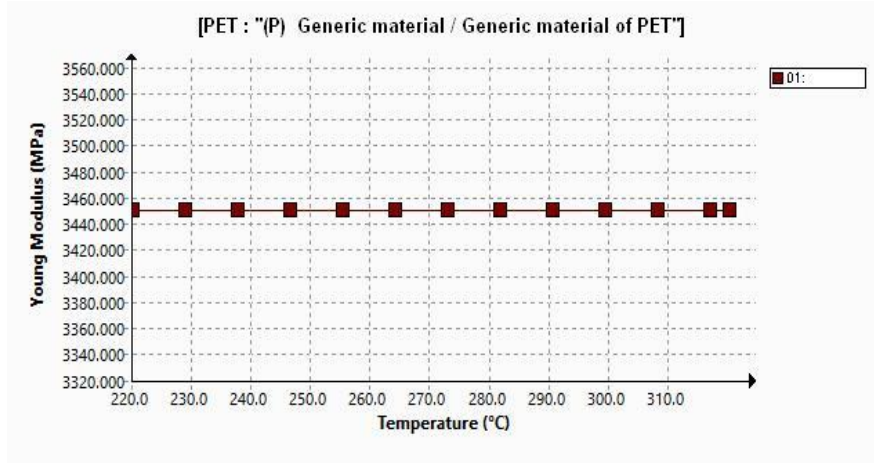
Model Reference	Properties
	<p>Material Name: PET</p> <p>Product Name: "(P) Generic material / Generic material of PET"</p> <p>Melt Temperature: 270.00 °C</p> <p>Mold Temperature: 100.00 °C</p> <p>Ejection Temperature: 150.00 °C</p> <p>Transition Temperature: 210.00 °C</p> <p>Specific Heat: 2.7000000000e+07 erg/(g-C)</p> <p>Thermal Conductivity: 1.6000000000e+04 erg/(sec-cm-K)</p> <p>Young Modulus: 3.4500000000e+10 dyne/cm2</p> <p>Poisson's Ratio: 4.0000000000e-01</p>



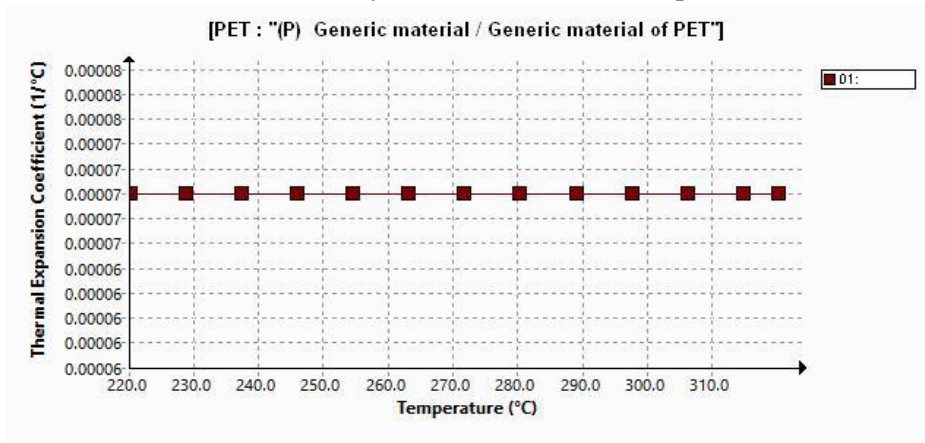
Polymer Viscosity Graph



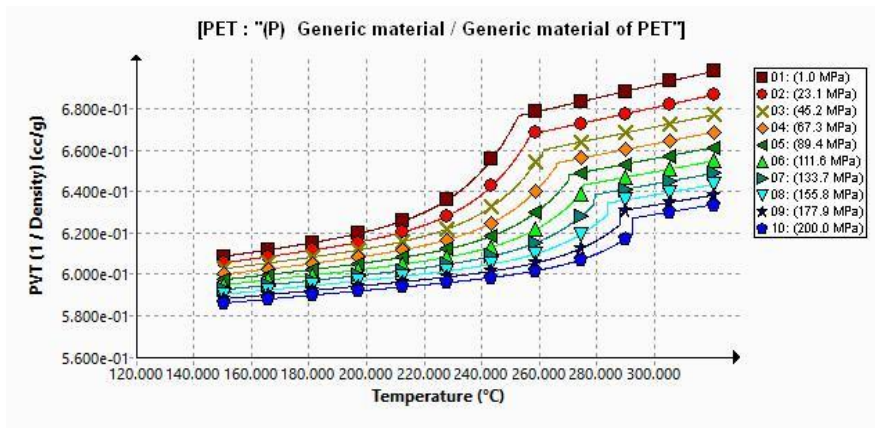
Polymer Specific-Heat Graph



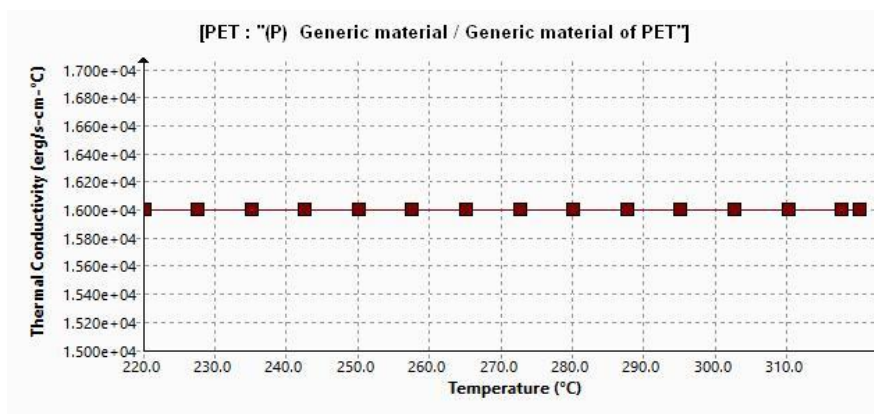
Polymer Elastic-Modulus Graph



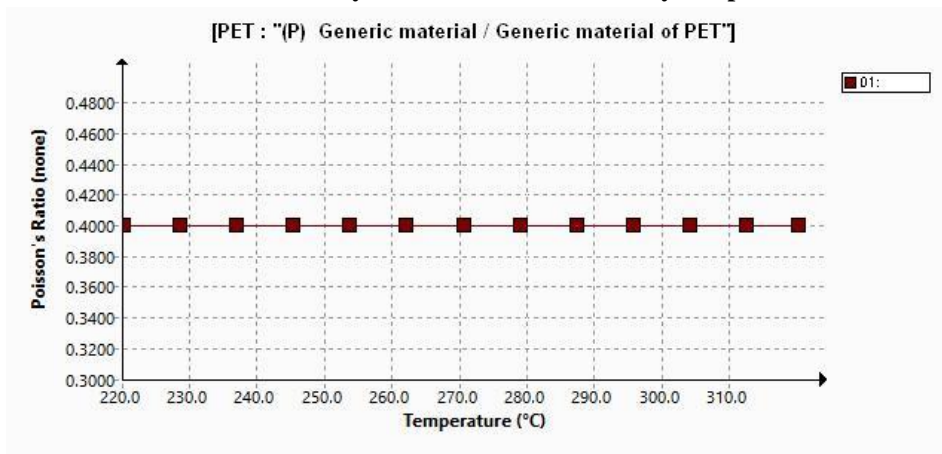
Polymer Linear-Thermal-Expansion-Coefficient Graph



Polymer Specific-Volume Graph



Polymer Thermal-Conductivity Graph



Polymer Poisson-Ratio Graph

Process Parameters

Comments:

Fill Settings

Filling Time	1.42 sec
Main Material Melt Temperature	270 °C
Mold Wall Temperature	100 °C
Injection Pressure Limit	100 MPa
Flow Rate Limit	194 cc/s
Flow/Pack Switch Point (% Filled Volume)	100 %
Pressure Holding Time	3.48 sec
Total Time in Pack Stage	25.09 sec
Auto Filling Time (1: Yes, 0: No)	1
Auto Packing Time (1: Yes, 0: No)	1
Venting Analysis (1: Yes, 0: No)	0
Cavity Initial Air Pressure	0.101 MPa
Cavity Initial Air Temperature	30 °C
Temperature Criteria for Short Shots (1: Yes, 0: No)	1
Temperature Criteria for Short Shots	210 °C
Clamp Force Limit	100 Tonne

Warp Settings

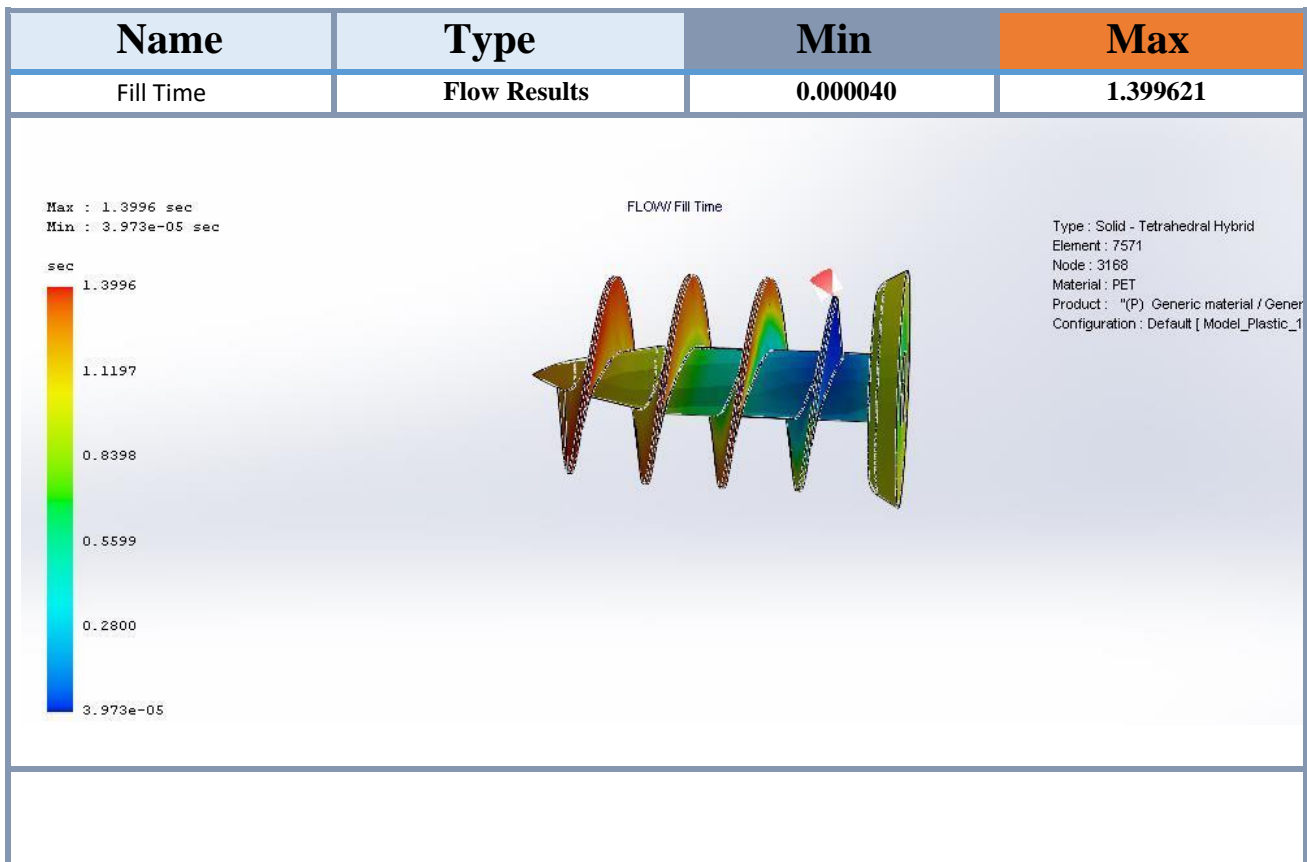
Ambient Temperature	30 °C
---------------------	-------

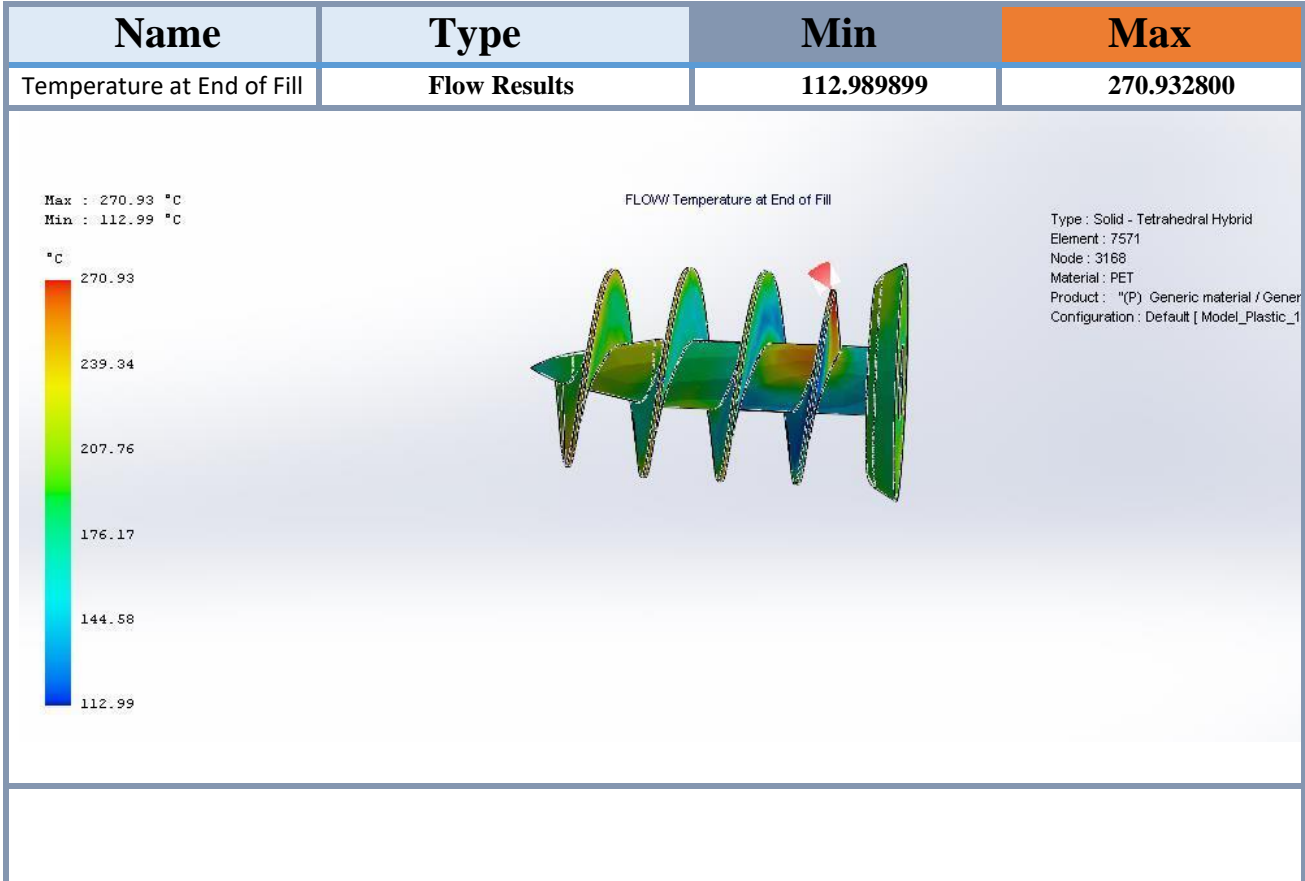
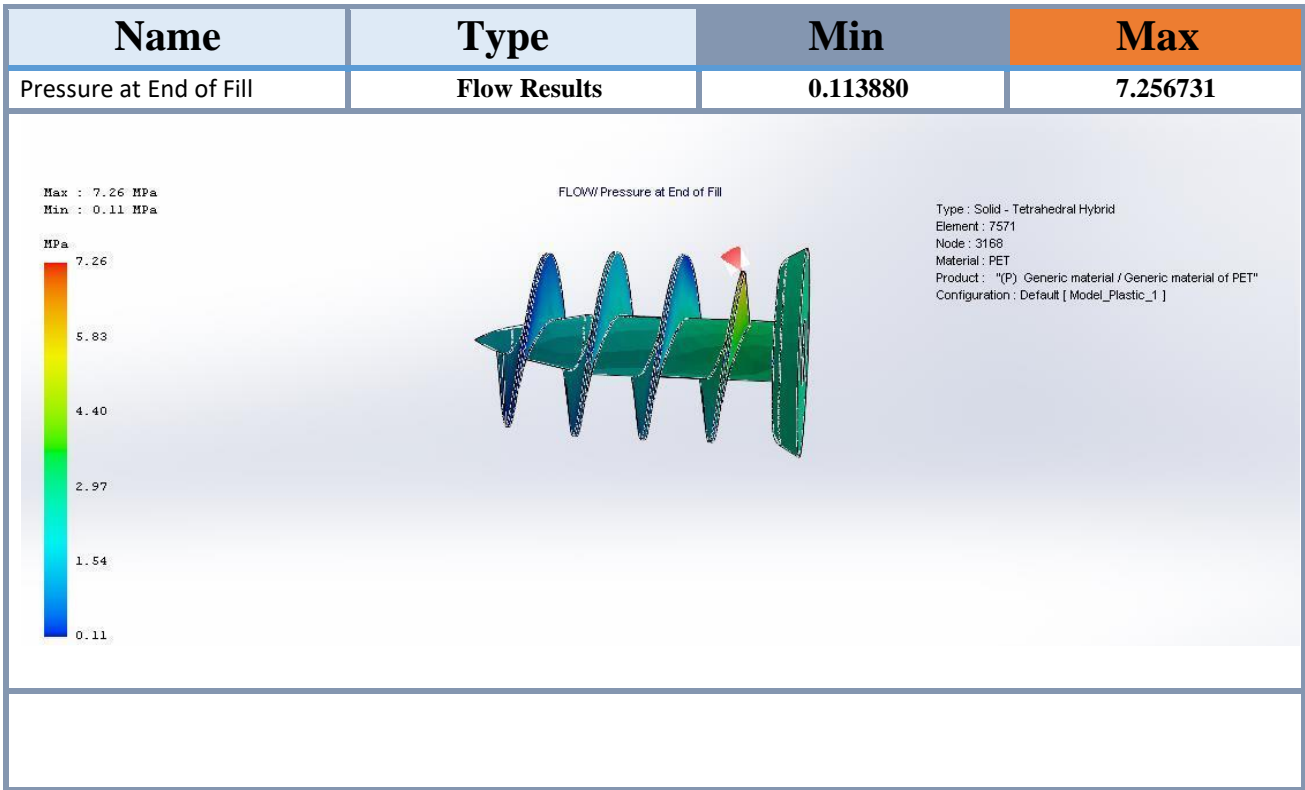
Flow Results

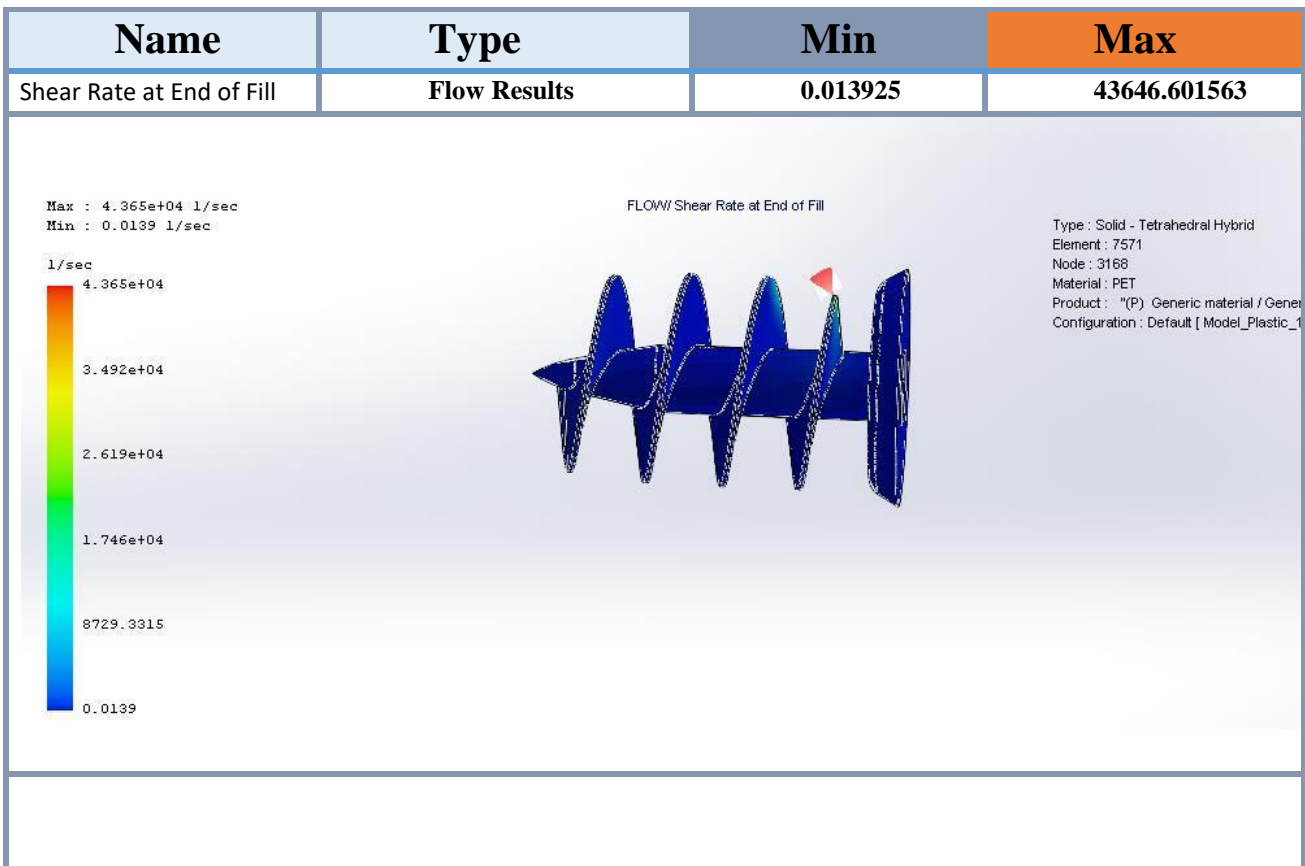
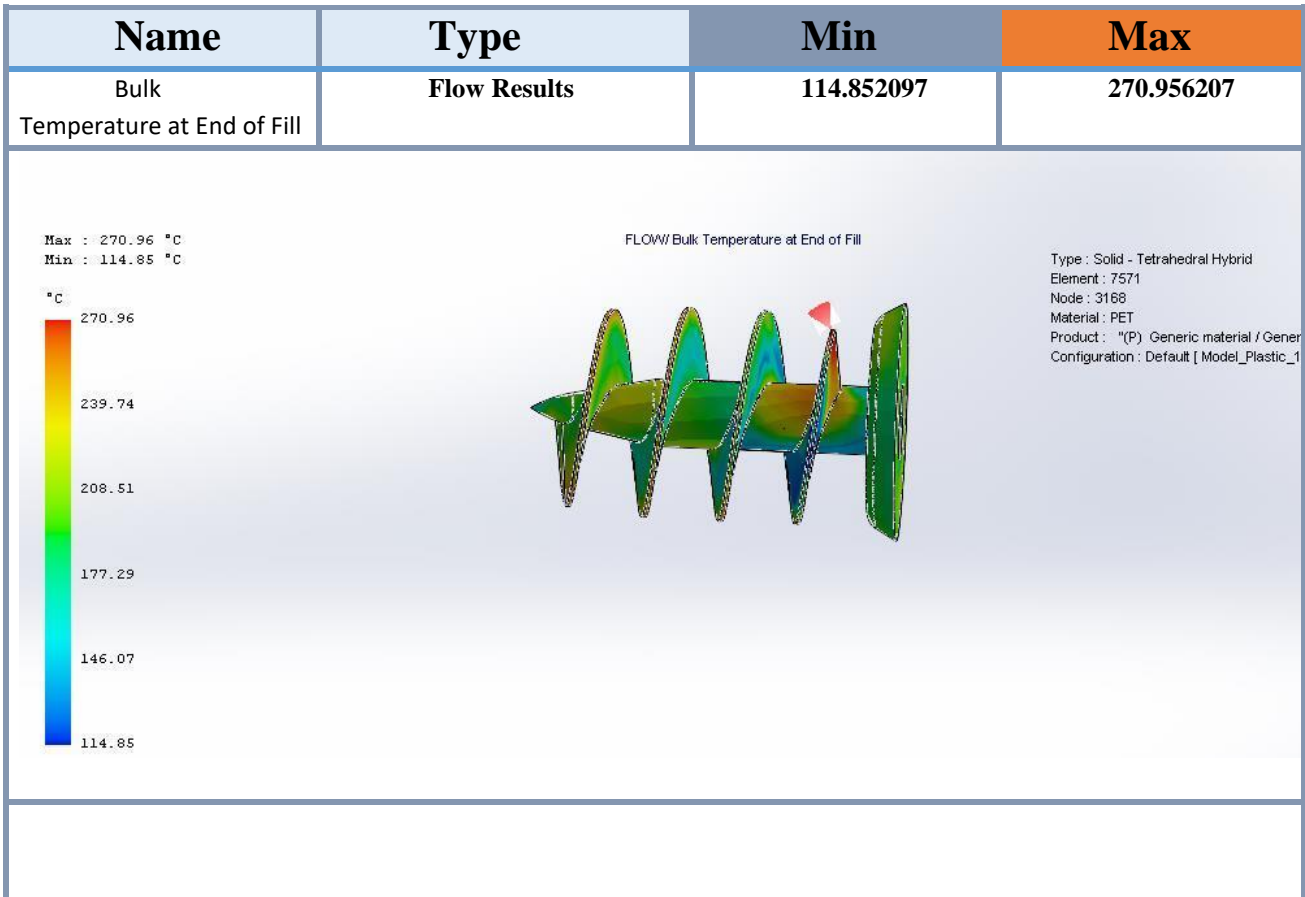
Comments:

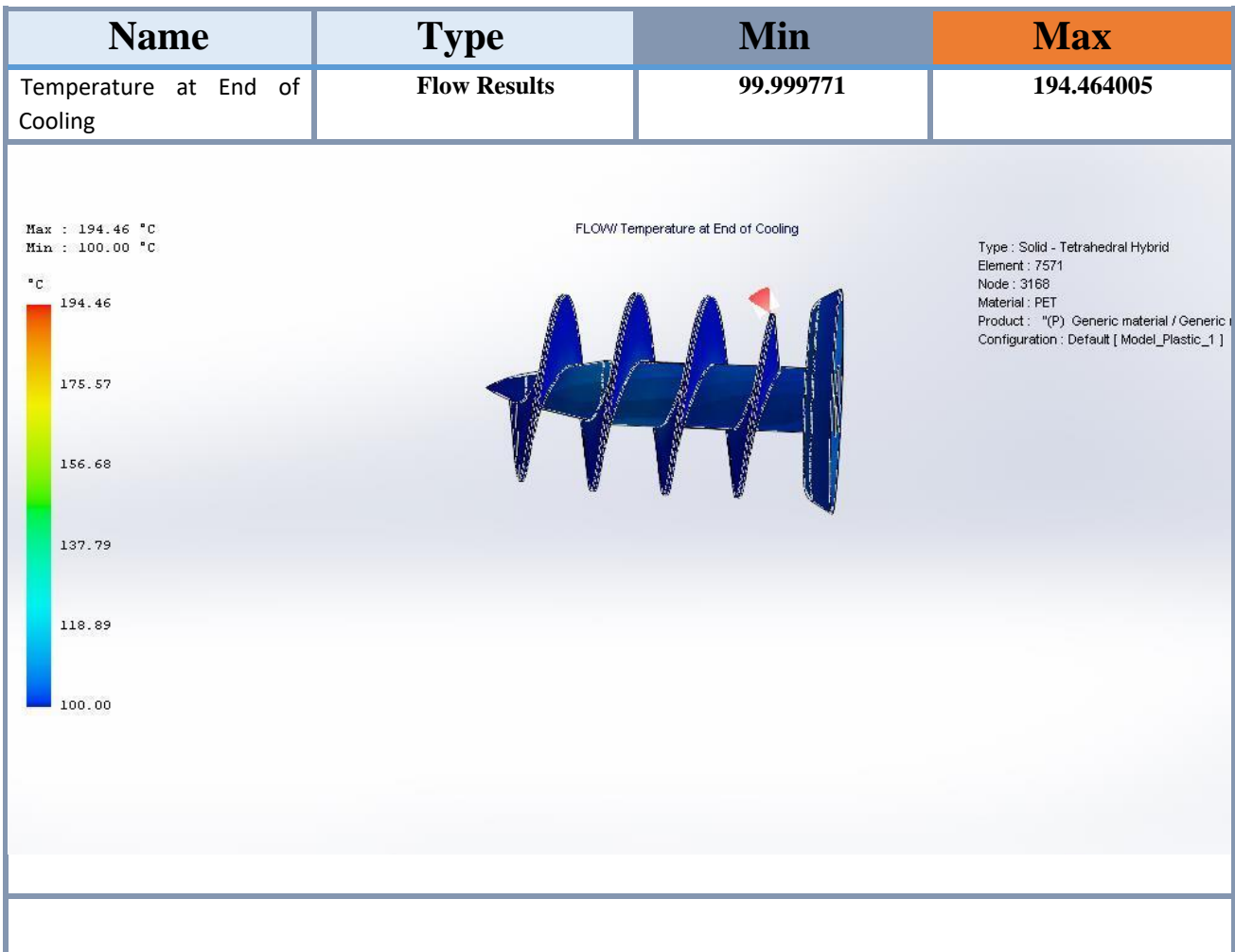
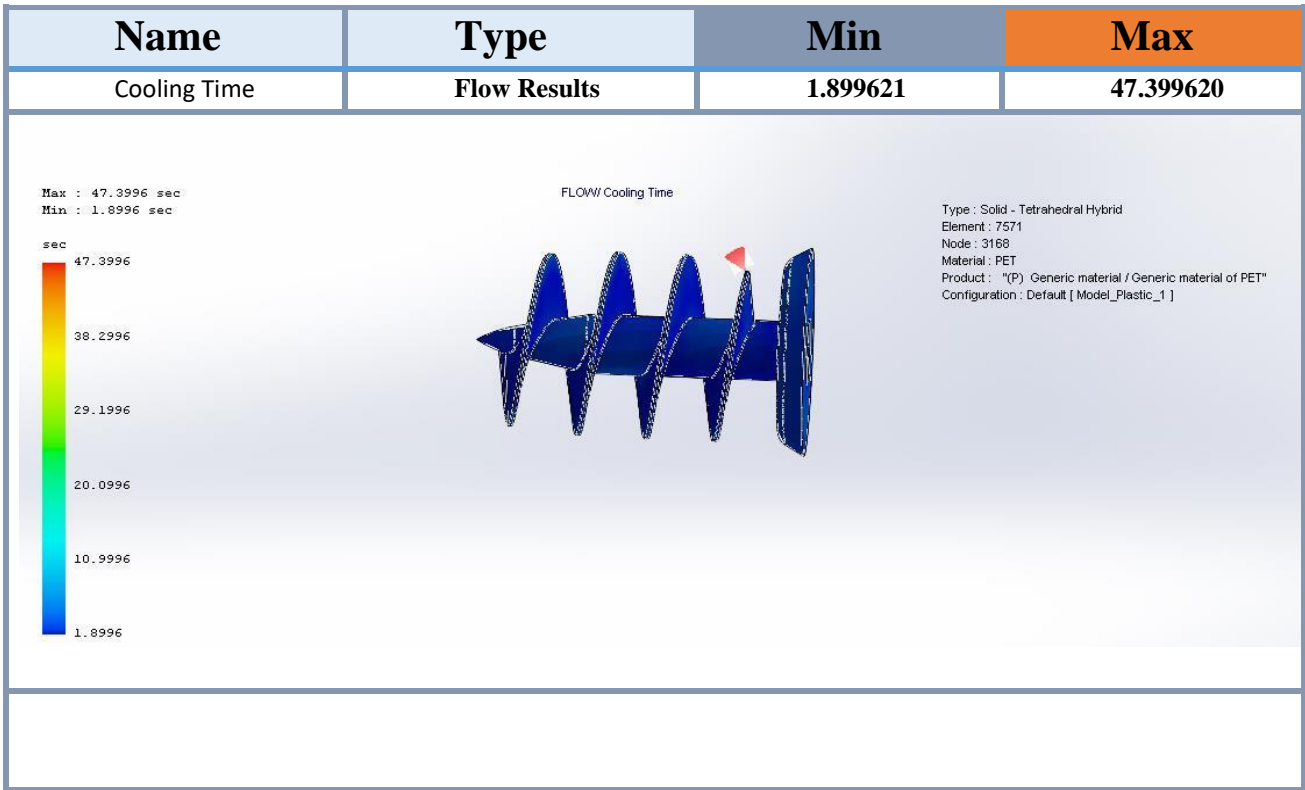
Flow Summary

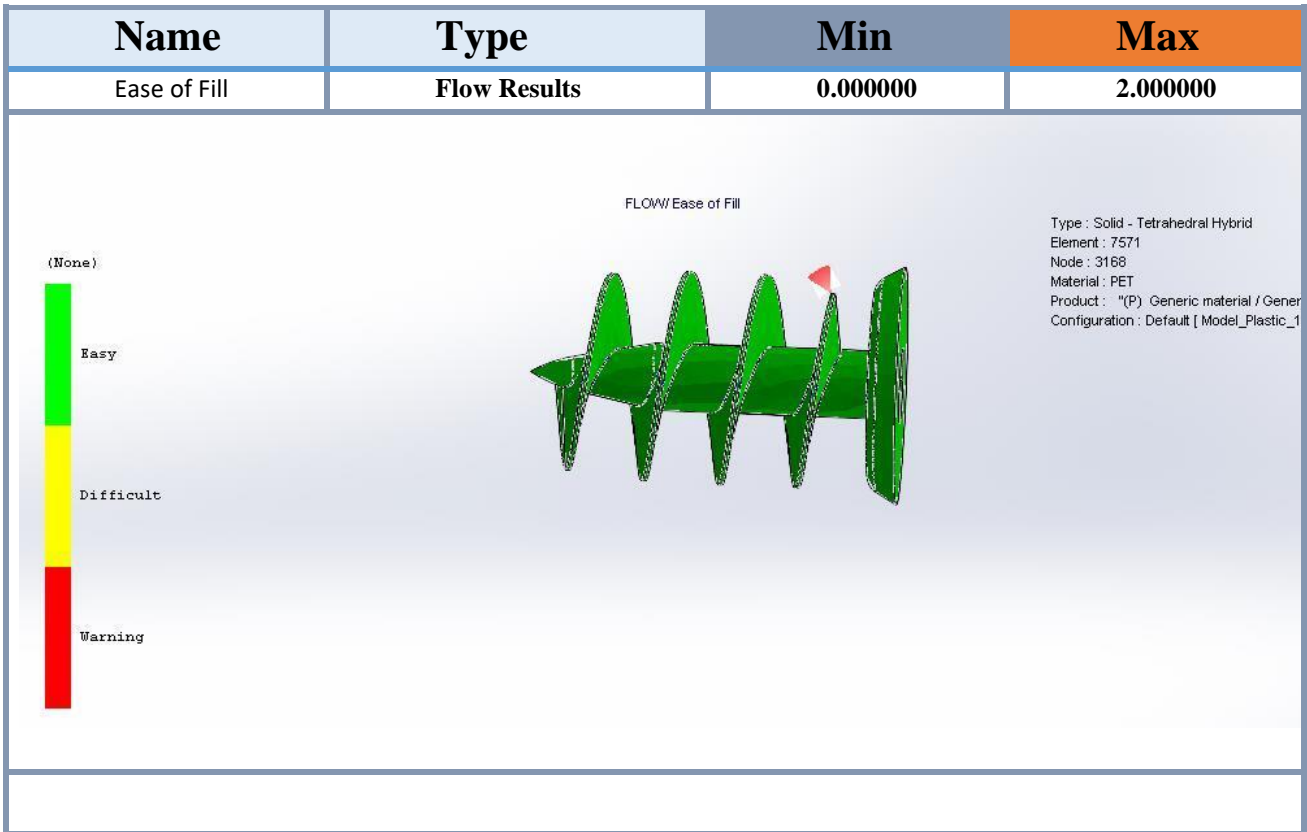
X-dir. Clamping Force	0.1043 Tonne
Y-dir. Clamping Force	0.2925 Tonne
Z-dir. Clamping Force	0.1070 Tonne
Required injection pressure	7.2567 Mpa
Max. real temperature	271.0828 °C
Max. bulk temperature	271.1062 °C
Max. shear stress	0.2139 Mpa
Max. shear rate	43646.6000 1/sec
CPU Time	330.80 sec
Cycle Time	53.80 sec
 - 1. Filling Time	1.40 sec
 - 2. Cooling Time	47.40 sec
 - 3. Mold Open Time	5.00 sec





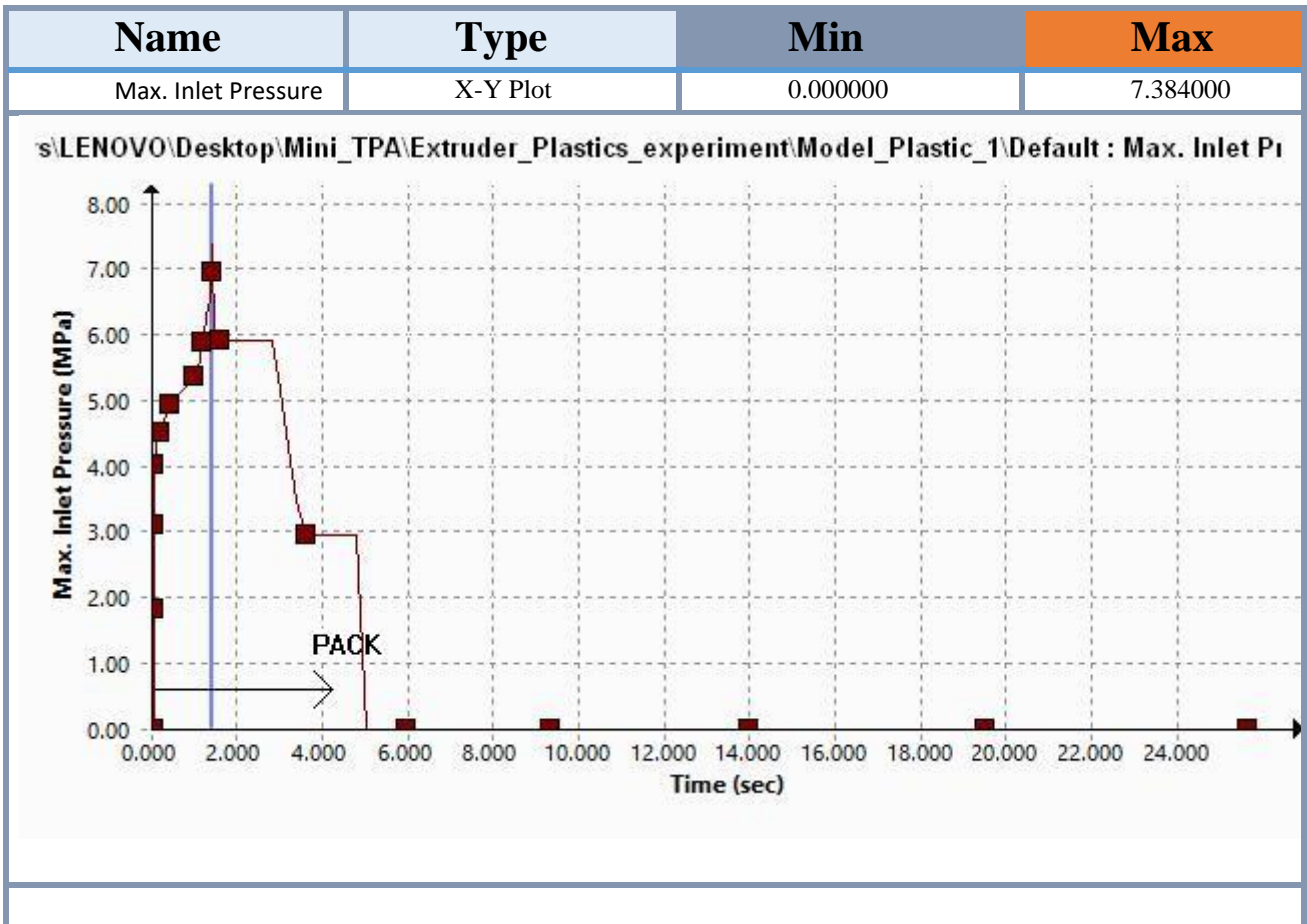






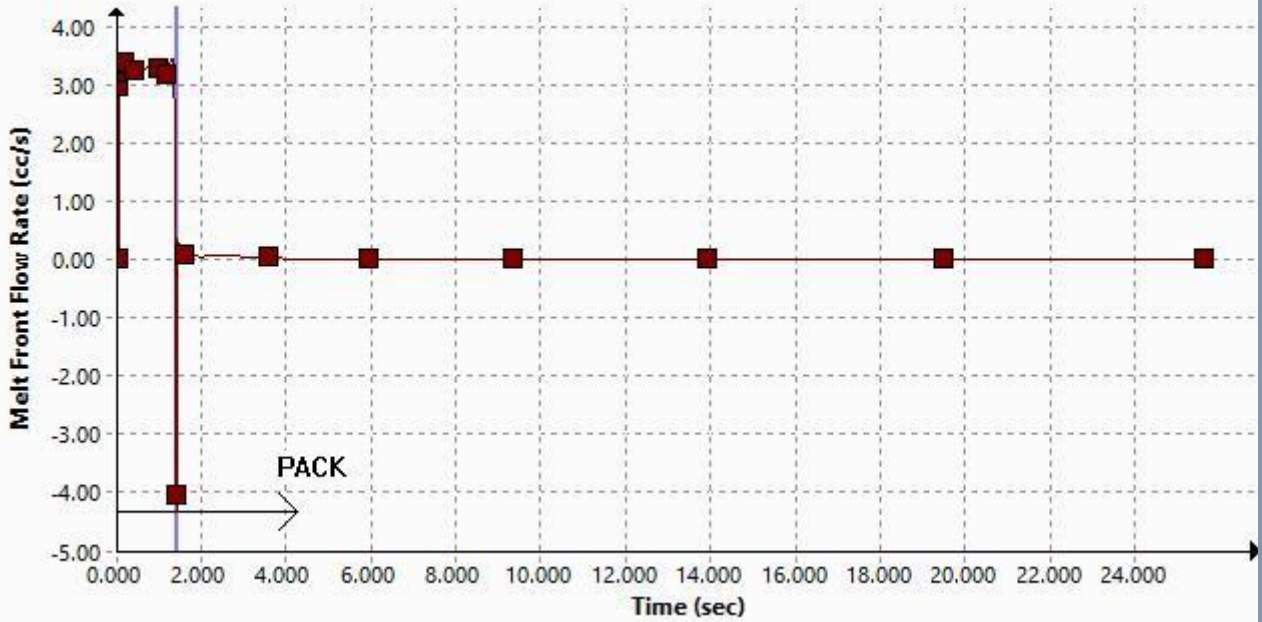
X-Y Plot

Comments:



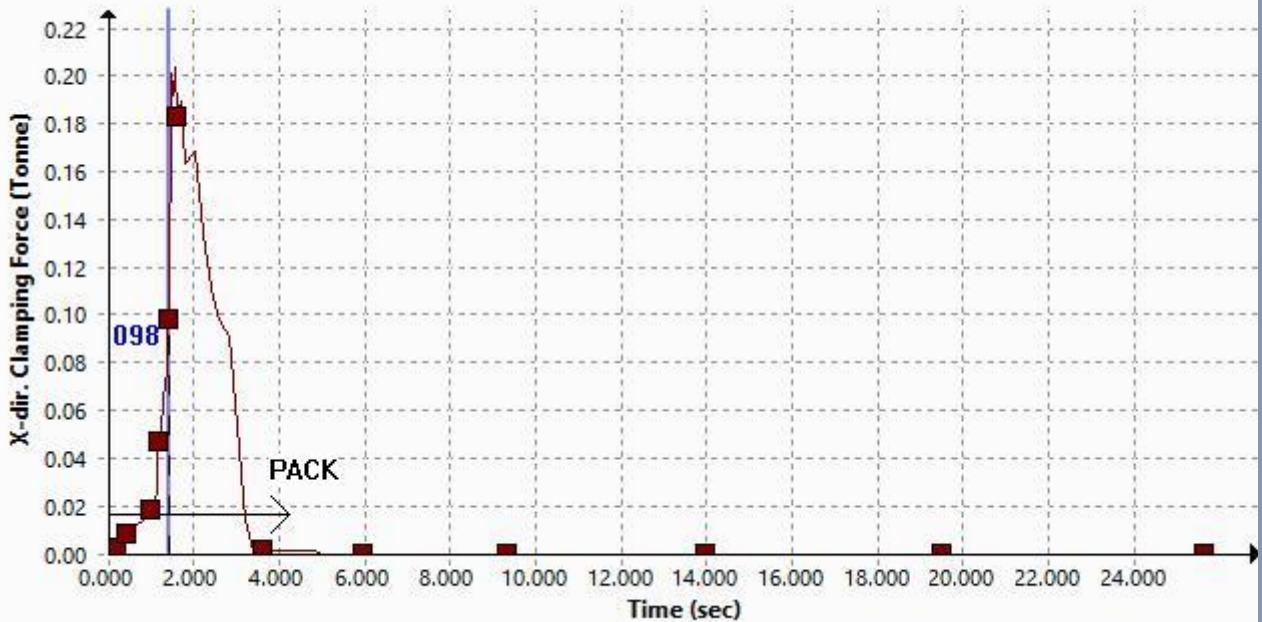
Name	Type	Min	Max
Melt Front Flow Rate	X-Y Plot	-4.345000	3.430000

\\LENOVO\Desktop\Mini_TPA\Extruder_Plastics_experiment\Model_Plastic_1\Default : Melt Front Fl



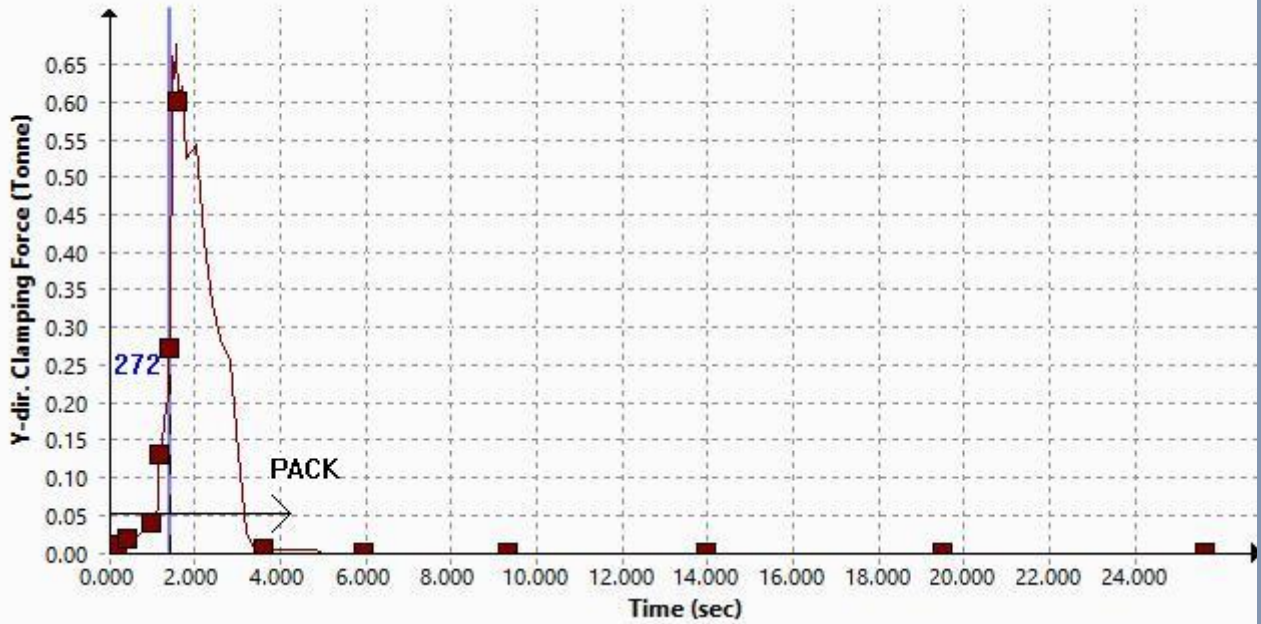
Name	Type	Min	Max
X-dir. Clamping Force	X-Y Plot	0.000000	0.204000

\\LENOVO\Desktop\Mini_TPA\Extruder_Plastics_experiment\Model_Plastic_1\Default : X-dir. Clampir



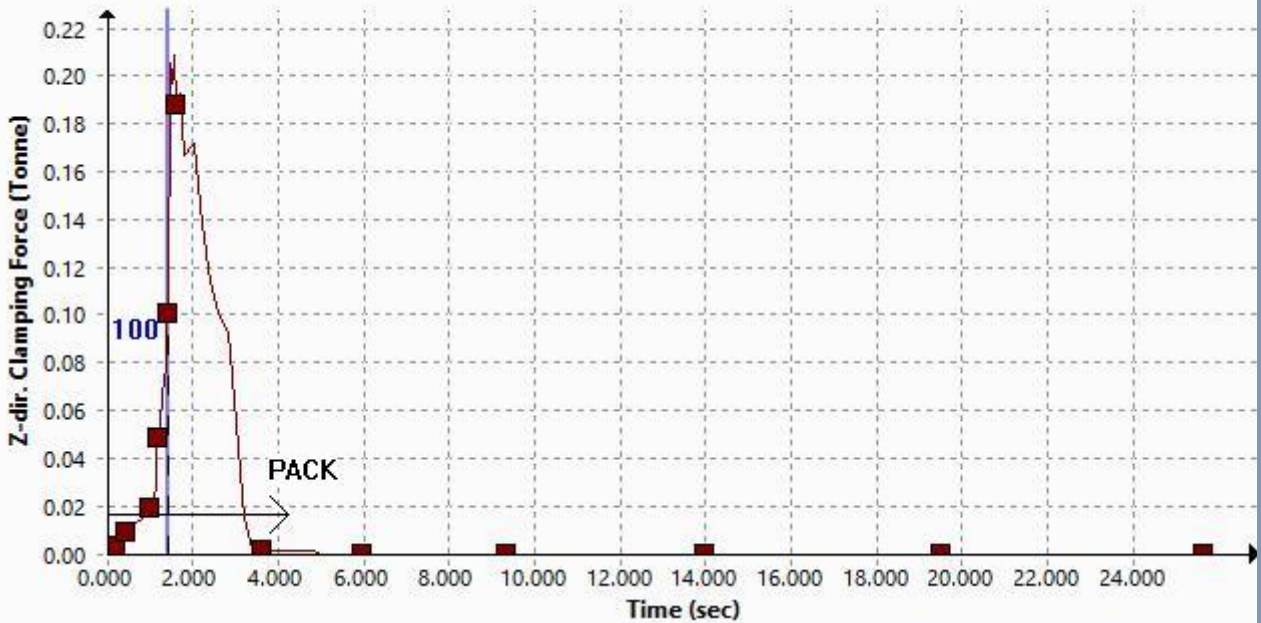
Name	Type	Min	Max
Y-dir. Clamping Force	X-Y Plot	0.000000	0.677000

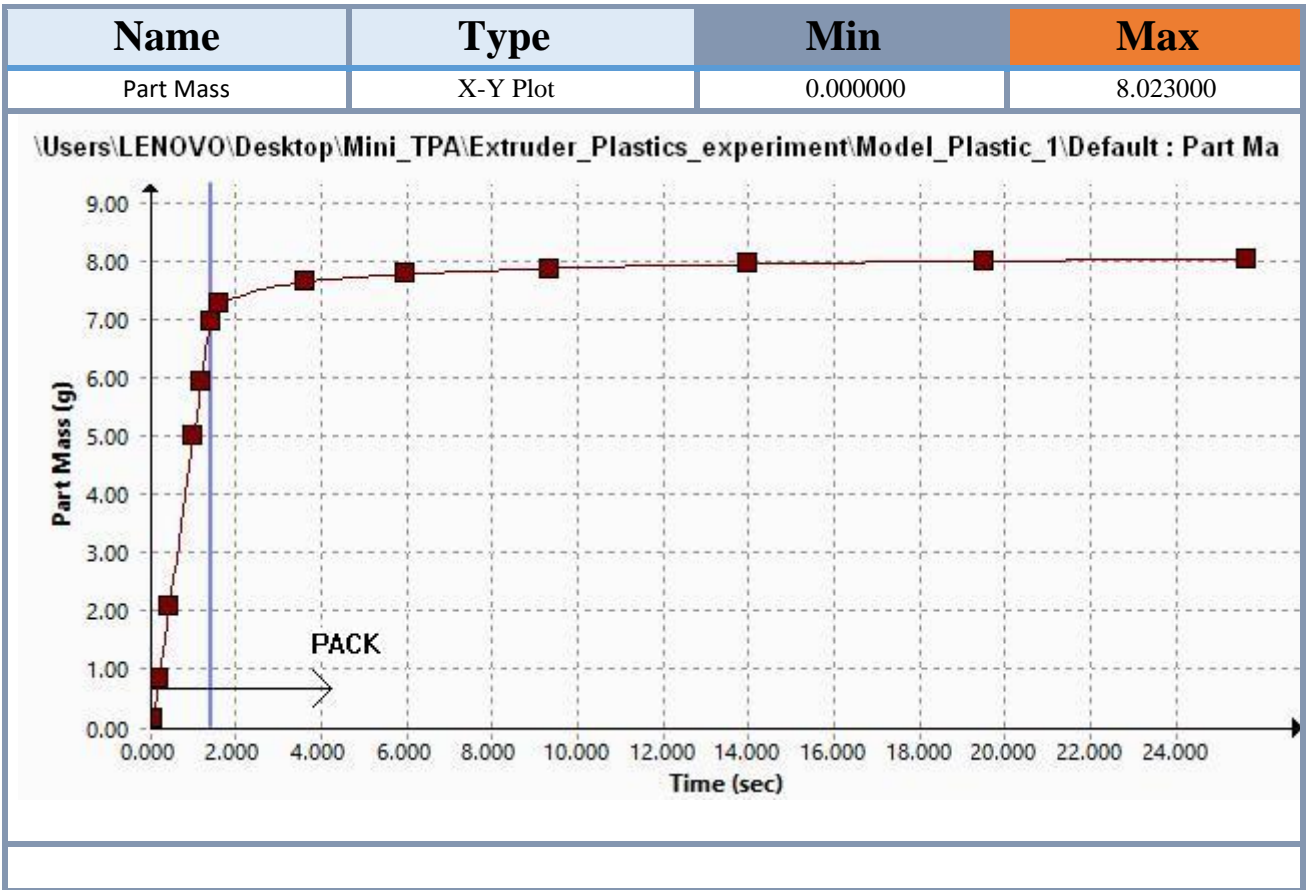
\\ALENOVO\Desktop\Mini_TPA\Extruder_Plastics_experiment\Model_Plastic_1\Default : Y-dir. Clampin



Name	Type	Min	Max
Z-dir. Clamping Force	X-Y Plot	0.000000	0.209000

\\ALENOVO\Desktop\Mini_TPA\Extruder_Plastics_experiment\Model_Plastic_1\Default : Z-dir. Clampin





Conclusion:

ЗМІСТ

1 МЕТА РОБОТИ	3
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	3
2.1 Загальне поняття про технологію лиття під тиском	3
2.2 Модуль програмного аналізу SolidWorks Plastics	6
2.3 Вихідні дані для моделювання та аналізу процесу лиття під тиском	6
2.4 Основні етапи підготовки даних, моделювання та аналізу процесу лиття деталі	8
2.5 Програмне забезпечення для виконання роботи	20
3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА СТРУКТУРА ЗВІТУ	21
4 ЗАВДАННЯ НА ПРАКТИЧНУ РОБОТУ	21
5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	25
6 ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ	25
Додаток А. Приклад звіту про результати аналізу процесу лиття деталі під тиском за допомогою інструменту SolidWorks Plastics	27

Для нотаток